

# Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle

Eine Erweiterung tradierter Entwurfsgrundlagen unter Berücksichtigung  
schall- und lichttechnischer Aspekte

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

Vorgelegt von

**Ewelina Zapala**

aus Starachowice

Hauptberichter: Prof. Dr. Dr. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek  
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren,  
Universität Stuttgart

Mitberichter: Prof. Dr. phil. Gerd de Bruyn  
Institut Grundlagen moderner Architektur und  
Entwerfen, Universität Stuttgart

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Juli 2018

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart, 2018



---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) an der Universität Stuttgart.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Dr. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek. Er gab mir die Anregung zu dieser Arbeit und stand jederzeit für fachliche Diskussionen zur Verfügung. Ich danke ihm herzlich für seine Denkanstöße und für die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Professor Dr. phil. Gerd de Bruyn danke ich sehr für die Übernahme des Mitberichts und für den wertvollen fachlichen Diskurs während der Bearbeitung dieser Arbeit. Bei Herrn Professor Dr. phil. Stephan Trüby möchte ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Ich danke außerdem Herrn Dipl.-Ing., M.H.Edu. Mario Miscioscia für seine konstruktive Begleitung im Labor für Bau- und Raumakustik an der Hochschule RheinMain in Wiesbaden.

Bei allen Angehörigen des ILEK bedanke ich mich für ihre Unterstützung, die kollegiale Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich herzlich für den steten Rückhalt in dieser Zeit, besonders meinem Ehemann Dr. Martin Mikusz.



---

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	iii
Inhaltsverzeichnis.....	v
Abbildungsverzeichnis.....	vii
Tabellenverzeichnis .....	xi
Abkürzungsverzeichnis.....	xii
Zusammenfassung.....	xiii
Abstract.....	xv
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	4
1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit.....	7
<b>2. Phänomenologische und architekturtheoretische Einordnung der Faltung.....</b>	<b>9</b>
2.1 Das Phänomen der Faltung.....	9
2.1.1 Faltung in Natur und Technik.....	10
2.1.2 Faltung in Mode, Design und Kunst.....	12
2.1.3 Faltung im Bauwesen.....	18
2.2 Architekturtheoretische Einordnung der Faltung.....	23
2.2.1 Die Theorie der Bekleidung und das Ornament bei Semper.....	24
2.2.2 Loos' Haltung – die Ornamentlosigkeit.....	26
2.2.3 Der Einfluss von Deleuze.....	28
2.2.4 Zeitgenössische Tendenzen.....	31
<b>3. Systematisierung von Faltstrukturen aus architektonischer Sicht.....</b>	<b>37</b>
3.1 Systematisierung von Faltstrukturen im Morphologischen Kasten.....	37
3.2 Anwendung und konstruktive Durchbildung.....	39
3.3 Geometrische Durchbildung.....	41
3.3.1 Geometrische Anordnung der Faltkanten und Schnittpunkte.....	41
3.3.2 Geometrische Anordnung der Faltflächen.....	46
3.4 Materialsteifigkeit und Materialverbrauch.....	51
3.5 Falntechniken und Formstabilisierungsmethoden.....	52
<b>4. Übertragung von Faltstrukturen auf textile Werkstoffe.....</b>	<b>57</b>
4.1 Materialspezifische Eigenschaften textiler Werkstoffe.....	57
4.1.1 Struktureller Aufbau von Geweben.....	58
4.1.2 Beschichtete faltbare Textilien.....	59
4.1.3 Unbeschichtete faltbare Textilien.....	61
4.2 Gestaltungsstudien zur Faltenbildung.....	62
4.2.1 Facettenfaltung mittels Raffung.....	63
4.2.2 Facettenfaltung mittels Tessellations.....	70

---

4.2.3	Längsfaltung mittels Trennen, Verformen und Zusammenfügen des Materials.....	74
4.2.4	Abschließende Bemerkungen zu den Gestaltungsstudien....	77
<b>5.</b>	<b>Schalldämmwirkung textiler Faltstrukturen.....</b>	<b>79</b>
5.1	Angewendete Grundlagen und Ansätze der Schalldämmung in den experimentellen Untersuchungen.....	79
5.1.1	Einschalige Bauteile.....	81
5.1.2	Zwei- und mehrschalige Aufbausysteme.....	83
5.1.3	Strukturierte Oberflächen.....	86
5.1.4	Messverfahren zur Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauteilen.....	86
5.1.5	Bewertung der Schalldämmung.....	88
5.2	Bisherige Ansätze und Methoden zur Verbesserung der schalldämmenden Eigenschaften von Membrankonstruktionen....	89
5.3	Experimentelle Untersuchung der akustischen Wirksamkeit von Faltstrukturen.....	91
5.3.1	Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes $R_w$ bei Versuchsreihe 1.....	92
5.3.2	Diskussion der Messergebnisse der Versuchsreihe 1.....	95
5.3.3	Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes $R_w$ bei Versuchsreihe 2.....	97
5.3.4	Diskussion der Messergebnisse der Versuchsreihe 2.....	100
<b>6.</b>	<b>Lichtdurchlässigkeit befüllter Faltstrukturen.....</b>	<b>103</b>
6.1	Angewendete Grundlagen der Lichtdurchlässigkeit von befüllten Faltstrukturen in den Experimenten.....	103
6.2	Bisherige Ansätze und Methoden zur Verbesserung der Dämmeigenschaften in Membrankonstruktionen und ihre Auswirkungen auf die Lichtdurchlässigkeit.....	107
6.3	Experimentelle Untersuchung der solaren Transmission von befüllten Faltstrukturen.....	108
6.3.1	Ermittlung der solaren Transmissionswerte befüllter Faltstrukturen.....	108
6.3.2	Diskussion der Messergebnisse.....	112
<b>7.</b>	<b>Neue Entwurfsansätze bei der Anwendung von Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle.....</b>	<b>115</b>
7.1	Erweiterung tradierter Entwurfsmethoden.....	115
7.1.1	Entkopplung der Hüll- von der Tragfunktion.....	116
7.1.2	Dualität mittels Faltstrukturen.....	118
7.2	Emanzipation der Oberfläche.....	121
7.2.1	Ornamentierung.....	121
7.2.2	Maßstäblichkeit.....	124
<b>8.</b>	<b>Kritische Würdigung und Ausblick.....</b>	<b>129</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>xvii</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 2.1</b>	Falten bei Madame Grès, Paris 1962.....	13
<b>Abb. 2.2</b>	Falten bei Roberto Capucci, Rom 1992.....	13
<b>Abb. 2.3</b>	Falten bei Thea Bjerg, Kopenhagen 2006.....	13
<b>Abb. 2.4</b>	Falten bei Issey Miyake, Tokyo 2015.....	13
<b>Abb. 2.5</b>	Leichtes Polyester mit feinen und unregelmäßigen Plisseefalten aus der Kollektion „Pleats Please“ von Issey Miyake.....	14
<b>Abb. 2.6</b>	„Wooden Textiles“ Collection von Elisa Strozyk.....	16
<b>Abb. 2.7</b>	Gewandstudie zum „Heller-Altar“, Albrecht Dürer, 1508.....	17
<b>Abb. 2.8</b>	Skulptur „Die Verzückerung der heiligen Teresia“, Gian Lorenzo Bernini, 1652.....	17
<b>Abb. 2.9</b>	Verhüllter Reichstag, Berlin, Christo und Jeanne-Claude, 1995.....	17
<b>Abb. 2.10</b>	Falttragwerk mit V-förmiger Faltung, Sportausbildungszentrum Mülimatt in Burgg/Schweiz, Studio Vacchini, 2011.....	21
<b>Abb. 2.11</b>	Gebäudehülle mit unregelmäßig ondulierender Faltung der Vitra Produktionshalle in Weil am Rhein, SANAA Architekten, 2012.....	21
<b>Abb. 2.12</b>	Mero-Messestand Nautilus, Werner Sobek Design 2002.....	22
<b>Abb. 2.13</b>	Entfaltung der Überdachung des Rothenbaum-Stadions, Werner Sobek und Schweger+Partner, Hamburg, 1997.....	23
<b>Abb. 2.14</b>	Bewegliche Klappläden, Kifer Techik Showroom, Ernst Giselbrecht und Partner, Steiermarkt, 2007.....	23
<b>Abb. 2.15</b>	Bewegliche Mashrabiya, Al Bahar Towers, Aedas Interiors, Abu Dhabi, 2012.....	23
<b>Abb. 2.16</b>	Curtain-Wall House von Shigeru Ban, Tokio 1995.....	23
<b>Abb. 2.17</b>	Masterplan des Rebstock-Parkgeländes, Frankfurt, von Peter Eisenman.....	30
<b>Abb. 2.18</b>	Institut du Monde Arabe, Mashrabiya der Südfassade in Paris, Jean Nouvel, 1987.....	33
<b>Abb. 2.19</b>	Ricola Mulhouse, Fotografie von Karl Blossfeldt, Herzog und de Meuron, 1999.....	33
<b>Abb. 2.20</b>	Wohnhaus in Aggstaff, Hild und K Architekten, 2000.....	33
<b>Abb. 3.1</b>	Systematisierung von Faltstrukturen im Morphologischen Kasten..	38
<b>Abb. 3.2</b>	V-förmige Facettenfaltung.....	39
<b>Abb. 3.3</b>	Parallele Longitudinalfaltungen, Papierskulptur, Paul Jackson.....	42

<b>Abb. 3.4</b>	Nicht-parallele Longitudinalfaltungen, Papierskulptur, Matt Shlan.....	42
<b>Abb. 3.5</b>	V-förmige Facettenfaltung.....	44
<b>Abb. 3.6</b>	Rautenförmige Facettenfaltung.....	44
<b>Abb. 3.7</b>	Diagonale (spiralförmige) Facettenfaltung.....	44
<b>Abb. 3.8</b>	Knitterfalten „ <i>Microcosme</i> “ von Vincent Floderer.....	46
<b>Abb. 3.9</b>	Faltungszustand ausgehend vom Öffnungswinkel der Faltung.....	47
<b>Abb. 3.10</b>	Neigungswinkel der Faltung.....	48
<b>Abb. 3.11</b>	Faltungsprofil.....	50
<b>Abb. 3.12</b>	V-förmige Facettenfaltung erzeugt durch punktuelle Raffungen (Rückseite).....	52
<b>Abb. 3.13</b>	Maschinell gewebte, gestrickte und gewirkte Falten.....	53
<b>Abb. 3.14</b>	Textiles Origami, Tobias Batrla, 2013.....	54
<b>Abb. 3.15</b>	Rautenförmige Facettenfaltung zusammengefügt (vernäht) aus einzelnen Flächenelementen.....	54
<b>Abb. 3.16</b>	Formstabilisierung durch die Infusion von Epoxidharz.....	56
<b>Abb. 4.1</b>	Einordnung der untersuchten Faltstrukturen im Morphologischen Kasten.....	63
<b>Abb. 4.2</b>	Faltpatrone der Faltstruktur 1.....	65
<b>Abb. 4.3</b>	Faltstruktur 1 aus PVC/PES-Gewebe, Vorderseite (rechts), Rückseite (links).....	65
<b>Abb. 4.4</b>	Faltstruktur 1, unbeschichtetes PTFE-Gewebe.....	66
<b>Abb. 4.5</b>	Faltpatrone der Faltstruktur 2.....	67
<b>Abb. 4.6</b>	Faltstruktur 2 aus PTFE-Gewebe, Vorderseite (rechts), Rückseite (links).....	67
<b>Abb. 4.7</b>	Faltstruktur 2. Vorderseite mit pfeilartigen Strukturen, Rückseite mit punktuellen Raffungen durch Polyestergarn mit Steppstichen festgehalten. Material: Fluorpolymer beschichtetes Gewebe aus e-PTFE-Faser.....	68
<b>Abb. 4.8</b>	Faltpatrone der Faltstruktur 3.....	69
<b>Abb. 4.9</b>	Faltstruktur 3 in Polyester.....	69
<b>Abb. 4.10</b>	Faltpatrone der Faltstruktur 4.....	69
<b>Abb. 4.11</b>	Faltstruktur 4 in Polyester.....	69
<b>Abb. 4.12</b>	Faltpatrone der Faltstruktur 5.....	70
<b>Abb. 4.13</b>	Faltstruktur 5 in Seidenorganza.....	70
<b>Abb. 4.14</b>	Faltpatrone der Faltstruktur 6.....	72
<b>Abb. 4.15</b>	Faltstruktur 6 aus Polyester-Gittergewebe.....	72

<b>Abb. 4.16</b>	Faltstruktur 6 aus unbeschichtetem PTFE-Gewebe, Vorderseite (links), Rückseite (rechts).....	72
<b>Abb. 4.17</b>	Faltstruktur 6, fotografiert im Gegenlicht.....	73
<b>Abb. 4.18</b>	Faltpatrone der Faltstruktur 7.....	74
<b>Abb. 4.19</b>	Faltstruktur 7 aus beschichtetem PTFE-Gewebe - Vorderseite (links), Rückseite (rechts).....	74
<b>Abb. 4.20</b>	Faltpatrone der Faltstruktur 8.....	76
<b>Abb. 4.21</b>	Faltstruktur 8 aus PVC/PES-Gewebe, Typ III (links), Detailausschnitt (rechts).....	76
<b>Abb. 4.22</b>	Faltpatrone der Faltstruktur 9.....	77
<b>Abb. 4.23</b>	Faltstruktur 9 aus PVC/PES-Gewebe, Typ I.....	77
<b>Abb. 5.1</b>	Schematischer Verlauf der Schalldämmung einschaliger Bauteile in Abhängigkeit von der Frequenz.....	81
<b>Abb. 5.2</b>	Schalldämm-Maß einschaliger Bauteile unterschiedlicher flächenbezogenen Massen.....	82
<b>Abb. 5.3</b>	Schematischer Verlauf der Schalldämmung zweischaliger Bauteile in Abhängigkeit von der Frequenz.....	84
<b>Abb. 5.4</b>	Schemazeichnung von Messaufbauten zur Ermittlung der Luftschalldämmung eines Bauteiles im Bauakustiklabor (Zweiraumverfahren).....	87
<b>Abb. 5.5</b>	Beispiel für die Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes A..	89
<b>Abb. 5.6</b>	Probe 1, Längsfaltung mit diagonal verdrehten Streifen, zweifacher Materialverbrauch (Flächengewicht: 2,38 kg/m <sup>2</sup> ).....	93
<b>Abb. 5.7</b>	Probe 2, Facettenfaltung, punktuell und versetzt geraffte Struktur, zweifacher Materialverbrauch (Flächengewicht: 2,34 kg/m <sup>2</sup> ).....	93
<b>Abb. 5.8</b>	Probe 3, liegende Längsfaltung parallel verlaufend, dreifacher Materialverbrauch (Flächengewicht: 3,53 kg/m <sup>2</sup> ).....	93
<b>Abb. 5.9</b>	Probe 4, Facettenfaltung mit V-förmig gerafften Strukturen, dreifacher Materialverbrauch (Flächengewicht: 3,47 kg/m <sup>2</sup> ).....	93
<b>Abb. 5.10</b>	Gemessene Schalldämm-Maße $R_w$ in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 1 ( $m = 2,38 \text{ kg/m}^2$ ).....	94
<b>Abb. 5.11</b>	Gemessene Schalldämm-Maße $R_w$ in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 2 ( $m = 2,34 \text{ kg/m}^2$ ).....	94
<b>Abb. 5.12</b>	Gemessene Schalldämm-Maße $R_w$ in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 3 ( $m = 3,53 \text{ kg/m}^2$ ).....	95
<b>Abb. 5.13</b>	Gemessene Schalldämm-Maße $R_w$ in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 4 ( $m = 3,47 \text{ kg/m}^2$ ).....	95
<b>Abb. 5.14</b>	Vergleich der gemessenen Schalldämm-Maße in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei den Probekörpern 1, 2, 3 und 4.....	96

<b>Abb. 5.15</b>	Schnitt des Probekörperaufbaus der Versuchsreihe 2.....	98
<b>Abb. 5.16</b>	Befüllung der faltstruktur 2 mit Polycarbonat-Granulat.....	98
<b>Abb. 5.17</b>	Gemessene Schalldämm-Maße $R_w$ in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz beim unbefüllten Probekörper 2 ( $m = 2,34 \text{ kg/m}^2$ ).....	99
<b>Abb. 5.18</b>	Gemessene Schalldämm-Maße $R_w$ in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 2.1 ( $m = 3,58 \text{ kg/m}^2$ ).....	99
<b>Abb. 5.19</b>	Gemessene Schalldämm-Maße $R_w$ in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 2.2 ( $m = 6,87 \text{ kg/m}^2$ ).....	100
<b>Abb. 5.20</b>	Gemessene Schalldämm-Maße $R_w$ in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 2.3 ( $m = 36,74 \text{ kg/m}^2$ ).....	100
<b>Abb. 5.21</b>	Vergleich der gemessenen Schalldämm-Maße in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei den Probekörpern 2 (Versuchsreihe 1), sowie 2.1, 2.2 und 2.3.....	101
<b>Abb. 5.22</b>	Übersicht der Ergebnisse zur Untersuchung des bewerteten Schalldämm-Maßes in Bezug zur Masse.....	102
<b>Abb. 6.1</b>	Spektrum der solaren Strahlung.....	104
<b>Abb. 6.2</b>	Gesamttransmissions- und Reflexionsverhalten einer zweilagigen Membrankonstruktion (links); winkelabhängige Transmission und Reflexion an gekrümmten Oberflächen (rechts).....	106
<b>Abb. 6.3</b>	Füllmaterialien: Aerogel-Granulat (links), Polycarbonat-Granulat (rechts).....	109
<b>Abb. 6.4</b>	Pyranometer vom Typ CM 11 des Herstellers ‚Kipp und Zonen‘.....	111
<b>Abb. 6.5</b>	Schnitt des Probekörperaufbaus .....	113
<b>Abb. 7.1</b>	Einordnung der gewählten faltstruktur im Morphologischen Kasten .....	126
<b>Abb. 7.2</b>	Grafische Darstellung einer prallen Längsfaltung mit einem faltkantenabstand von 22,50 cm und ihrer scheinbaren Größe ( $\alpha$ ) in Abhängigkeit vom Betrachtungsabstand ( $r$ ).....	127
<b>Abb. 7.3</b>	Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle / PVC-PES-Prototypenmuster im Maßstab 1:1.....	128

*Soweit auf der entsprechenden Seite nicht anders angegeben, stammen alle Darstellungen und Fotos von der Autorin.*

---

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 6.1</b>	Eigenschaften des transluzenten Aerogel-Granulats.....	110
<b>Tab. 6.2</b>	Gemessene solare Transmissionswerte der getesteten, befüllten Faltstrukturen aus PES/PVC- und PTFE-Gewebe.....	112
<b>Tab. 7.1</b>	Berechnung der scheinbaren Größen in Abhängigkeit von der Betrachtungsentfernung für eine Faltstruktur der Größe 22,50 cm.	127

---

## Abkürzungsverzeichnis

Folgende Abkürzungen werden im Rahmen der Arbeit verwendet. Davon abweichende oder ergänzende Definitionen bzw. hier nicht aufgeführte Abkürzungen werden im Text erläutert.

### Akronyme

IR	Infrarot
PC	Polycarbonat
PES	Polyester
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVDE	Polyvinylidendifluorid
PVC	Polyvinylchlorid
UV	Ultraviolett

### Lateinische Buchstaben

A	äquivalente Absorptionsfläche
cF	Schallgeschwindigkeit in der Luft
$E_{\downarrow\text{Solar}}$	Globalstrahlung
g	wahre Größe
f	Frequenz
$f_c$	Koinzidenzfrequenz
$f_n$	Platteneigenfrequenzen
$f_0$	Resonanzfrequenz des Masse - Feder - Systems
$f_{1,2,n}$	Eigenfrequenz des Luftzwischenraumes
$L_{p1}$	Schallpegel im Senderraum
$L_{p2}$	Schallpegel im Empfangsraum
$P_1$	auftreffende Schallleistung
$P_2$	abgestrahlte Schallleistung
r	Entfernung
R	Schalldämm-Maß
R <sub>w</sub>	bewertetes Schalldämm-Maß
S	Prüffläche
Sensitivity	Empfindlichkeitswert
$T_m$	Membranlagendicke
$U_{\text{emf}}$	Pyranometerausgang

### Griechische Buchstaben

$\tau$	Transmissionsgrad
$\alpha$	scheinbare Größe oder Sehwinkel

---

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, wie textile Oberflächen mithilfe von Faltstrukturen gestaltet werden können, wenn sie zu ästhetischen Qualitäten und zur Verbesserung der schalltechnischen Eigenschaften textiler Gebäudehüllen bei gleichzeitiger Erhaltung einer hohen Lichttransmission beitragen sollen. Da Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle wenig erforscht sind, ist diese Arbeit explorativ ausgerichtet.

Den Ausgangspunkt bildet die phänomenologische und architekturtheoretische Einordnung der Faltung. Dabei werden potentiell auf das Bauwesen übertragbare Falprinzipien und ihre realen Anwendungen aus verschiedenen Fachdisziplinen herausgearbeitet. Im Bauwesen interessiert die Faltung aufgrund ihrer technisch-konstruktiven und ihrer räumlich-plastischen Wirkung. Reale „Meilensteine“ in beiderlei Hinsicht werden aufgezeigt. Die architekturtheoretische Betrachtung setzt an der Theorie der Bekleidung und des Ornaments von Semper an. Des Weiteren wird auf die kritische Haltung zum Ornament von Loos, sowie auf die weitreichende Analyse der Mannigfaltigkeit der Falte von Deleuze eingegangen. Abschließend werden die zeitgenössischen Tendenzen in der Architekturtheorie herausgearbeitet und mit realen Beispielen unterlegt.

Um Faltstrukturen analysieren und ihre Anwendungsmöglichkeiten für das Textile Bauen entdecken zu können, ist ihre systematische Einordnung aus architektonischer Sicht notwendig. Eine ebensolche Systematisierung wird in der vorliegenden Arbeit in Form eines Morphologischen Kasten vorgestellt, welcher definierte Merkmale und ihre Merkmalsausprägungen umfasst. Mit der gewählten Darstellungsmethode kann man das enorme Spektrum an möglichen Faltstrukturen analysieren und, davon ausgehend, neue Formen finden.

Nach dem einordnenden und systematisierenden Teil widmet sich die vorliegende Arbeit in ihrem experimentellen Teil den Fragestellungen, welche Faltstrukturen sich auf textile Gebäudehüllen übertragen lassen, inwieweit sie dabei zur Verbesserung der schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen beitragen, und inwieweit sie dabei schalltechnisch aktiviert werden können, ohne gleichzeitig die Lichtdurchlässigkeit der Oberfläche zu beeinträchtigen.

Die Arbeit präsentiert im Rahmen von experimentellen Gestaltungsstudien entstandene, unterschiedliche Längst- und Facettenfaltungen, die allesamt prototypisch im Maßstab 1:1 umgesetzt wurden. Die Faltstrukturen deuten das große

---

Spektrum der möglichen Erscheinungsformen von Faltungen an, die sich auf textile Gebäudehüllen übertragen lassen. Sie werden im Hinblick auf den Herstellungsprozess der Faltung und ihre Applikation auf die textile Gebäudehülle zu technisch-funktionalen als auch ästhetischen Aspekten (ggf. in Kombination) analysiert und diskutiert. Somit können sie als Grundlage für weite Variationen dienen.

Die durchgeführten Messungen im Akustiklabor zeigen, dass bestimmte Oberflächenmodifikationen einen Beitrag zur Verbesserung der Schalldämmwerte leisten können. So bieten facettierte Faltungen die Möglichkeit, die Oberflächenstruktur zu befüllen und somit die akustischen Eigenschaften der Oberfläche zu aktivieren. Die Verbesserung ist auf die Erhöhung der Masse und die Kopplung der beiden Membranlagen zurückzuführen. Die experimentellen Untersuchungen ergaben u.a., dass das sehr leichte Silicat-Aerogel-Granulat besonders effizient wirkt im Vergleich zum sehr schweren Polycarbonat-Granulat.

Die durchgeführten Messungen zur solaren Transmission zeigen, dass bestimmte Kombinationen von Faltstruktur, Gewebe und Befüllung weder die Lichtdurchlässigkeit, noch die Leichtigkeit des Systemaufbaus beeinträchtigen. Folglich können Synergien zwischen der akustischen Wirkweise und einer hohen Lichtdurchlässigkeit erzielt werden. Insgesamt stützen die erzielten Messergebnisse die Intention, die textile Gebäudehülle mithilfe von Faltstrukturen zu einem anpassungsfähigen System auszubauen.

Vor dem Hintergrund der bisherigen Ergebnisse geht die vorliegende Arbeit abschließend der Frage nach, welche neuen Entwurfsansätze mit der Anwendung von Faltstrukturen bei textilen Gebäudehüllen einhergehen. Insbesondere die Dualität, die aus der Verschmelzung von Ästhetik und Funktionalität resultiert und im Sinne einer neuen Falt-Ornamentik zu verstehen ist, bereichert die architektonische Sprache textiler Gebäudehüllen. Voraussetzung für Dualität ist das Verlassen tradierter Entwurfsansätze und die Entbindung der Hüll- von der Tragfunktion. Die damit einhergehende Emanzipierung der Oberfläche, die nicht mehr nur technische und funktionale Aspekte zu erfüllen hat, sondern auch eine sinnliche Inszenierung der Oberfläche zulässt, bedingt allerdings besonderen Augenmerks auf die Dimensionierung von Faltstrukturen.

---

## Abstract

The following dissertation examines the design of textile surfaces using fold structures, with the objective of enhancing the aesthetic and acoustic properties of textile building facades while maintaining a high level of light transmission. Due to the lack of existing research into the use of fold structures in the context of textile building facades, the work is organized as an exploratory study.

To form a basis for the investigation, folding typologies and approaches are first classified according to phenomenological and architectural theory. During this classification process, folding principles that could potentially be transferred to the building sector from related disciplines are identified. Fold structures and folding processes are relevant to building construction both due to their structural/technical and their spatial/sculptural properties, and realistic development milestones are identified and presented for both aspects. The treatment of architectural theory is based on Semper's theory of cladding and ornament. The critical view of ornament taken by Loos and the extensive analysis of the fold by Deleuze are also discussed. Finally, the contemporary tendencies in architectural theory are identified and highlighted with real-world examples.

The systematic classification of fold structures from an architectural perspective is necessary to allow their analysis and to identify potential applications in textile construction. A similar systematic approach is presented in this work in the form of a morphological box, consisting of defined characteristics organized into an array of categories. Using the chosen presentation method, the enormous spectrum of possible fold structures can be analyzed, and new structures can be discovered.

Following the classification and categorization sections, a series of experiments is presented to help understand the applicability of certain fold structures to textile building facades, to what extent fold structures contribute to the improvement of the sound insulating properties of these facades, and to what extent they can be acoustically activated without impairing the light transmission capabilities of the surface.

The experimental samples consisted of a number of different longitudinal and faceted fold structures which were developed through experimental design studies and then built as 1:1 scale prototypes. The fold structures which were chosen demonstrate the wide range of possible fold typologies that can be implemented in textile building facades. These samples are analyzed in the present study and their

---

manufacturing process and potential applications in textile building facades are discussed, both with respect to their technical and functional properties as well as their aesthetic qualities. The fold structures presented herein may also serve as the basis for further variations.

The measurements carried out in the acoustic laboratory showed that certain surface modifications can contribute to improving the sound insulation values. Faceted folds in particular provide the opportunity to fill portions of the surface structure and to thereby activate the acoustic properties of the surface. The improvement observed is presumably due to the increase in mass and the coupling of the two membrane layers. The experiments revealed that the very light silica-aerogel granulate is especially efficient compared to the relatively heavy polycarbonate granulate which was tested for comparison.

The light transmission measurements showed that certain combinations of fold structures, fabrics, and fill materials have a negligible effect on both light transmission and ease of assembly of the structures. As a result, synergies can be achieved between the acoustic properties and light transmission. Overall, the results obtained support the objective of expanding textile building facades into an adaptable building envelope system by utilizing fold structures.

On the basis of the results presented, the study concludes with the question of what new design approaches may be achievable with the use of fold structures in textile building facades. In particular, the duality that emerges from merging the aesthetics and functionality of these systems and which could be considered as a new fold-based style of ornamentation, enriches the architectural language of textile building facades. A prerequisite for this duality is the abandonment of traditional design approaches and the release of the facade from its structural support function. The associated emancipation of the facade surface – which is no longer limited to technical and functional requirements, but also permits a sensible exposition of the surface – opens unique new design opportunities, but also requires special attention to the design, detailing, and dimensioning of fold structures.

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation und Problemstellung

Aufgrund der rasanten Weiterentwicklung innovativer Textilien, welche oftmals von der Natur oder der Arbeit von Modedesignern inspiriert wird, entstehen neue Stoffe mit vielfältigen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten. Textilien sind zu einem hocheffizienten architektonischen Material geworden, dessen gestalterisches und bauphysikalisches Potential im Bereich der dritten Haut bisher allerdings nur in Ansätzen ausgeschöpft wird: Die heutige Textile Architektur zeichnet sich meist durch einen hohen Grad der Konfektionierung sowie durch eine Geometrie aus, die dem Kraftfluss folgt. Daraus resultiert eine Formensprache, die nicht die typisch stofflichen Eigenschaften besitzt. Attribute wie etwa das Anschmiegsame, das Flexible und das Gefaltete, die das Textile auszeichnen, gehen verloren.

Wünschenswert wäre es jedoch, beim Entwerfen *„das Ziel der faltenfreien gespannten monochromen Haut [zu] verlassen und textilem Bauen eine Qualität zurückzugeben, die es verloren hat: die des Stofflichen“* [[1] Sobek 1999]. Der Ansatz richtet sich auf das Verlassen einer glatten Oberfläche mit einem eingefrorenen Spannungszustand hin zu dem, was das Arbeiten mit Stoff eigentlich so reichhaltig macht – veränderte Farb- und Oberflächenwirkungen, Licht- und Schattenstrukturierungen, Faltung und Beweglichkeit. Der Wunsch vieler Architekten, eine Textile Architektur mit den typischen textilen Eigenschaften zu entwerfen, setzt eine Abwendung von tradierten Entwurfsgrundlagen voraus und erfordert eine Entkopplung der Hülle von ihrer primären Tragfunktion.

Dieses Verständnis der Gebäudehülle trat bereits im 19. Jahrhundert mit der Bekleidungslehre von Gottfried Semper auf, der das Verhältnis von architektonischem Kern und Hülle sowie von Ornament und Struktur umgewertet hat und die Schönheit eines Gebäudes in dessen Bekleidung zu finden wagte. Die Hülle wird so zum textilen Derivat, dessen Oberflächengestaltung und Ausdrucksformen aus der Verwendung neuer Materialien resultieren [[2] Semper 1860].

Nach Adolf Loos will der Architekt *„mit Hilfe der Materialien ... Gefühle in Menschen erzeugen, die eigentlich diesen Materialien noch nicht innewohnten“* [[3] Loos 1898] – denn erst über das Material und seine Oberfläche wird das Gebäude wahrgenommen. Die Umhüllung verleiht Menschen Sicherheit und Bequemlichkeit, und weist auf kulturelle und ästhetische Werte hin. Durch Material, Schnitt, Mauerwerk, Details und die Art und Weise des Tragverhaltens wird eine bestimmte Aura evoziert. Die Kleidung und die Gebäudehülle ergeben somit eine Analogie. Architekten wie

Modedesigner entwickeln Hüllen für Körper, die praktische und ästhetische Funktionen zugleich erfüllen sollen. Dabei spielen die Beschaffenheit der Oberfläche und ihre Wirkung eine entscheidende Rolle.

Eine Möglichkeit der Oberflächengestaltung ergibt sich durch Erzeugung von Faltungen. Die Faltung stabilisiert und formt zugleich, und ist dabei eine der einfachsten Methoden, um aus einer zweidimensionalen Fläche eine stabile, dreidimensionale Struktur zu kreieren. In der textilen Gebäudehülle bilden Faltstrukturen eine Art des Ornaments ab, das in erster Linie als schmückende und verzierende Maßnahme wahrgenommen wird. Dieses Falt-Ornament akzentuiert und steigert die ästhetische Wirkung des Stoffes, gliedert und belebt die Oberfläche, gleichzeitig bereichert es die Fläche um eine taktil erlebbare Komponente. Die Formvielfalt der Faltstrukturen wird aus dem Material selbst heraus entwickelt und nicht durch oberflächige Applikationen. Dies kann mit geeigneten Materialien und Techniken in unterschiedlichsten Maßstäben umgesetzt werden. Mittels Verknotung, Verflechtung oder Verdrehung des Materials können verschiedene Verformungsfiguren generiert werden, welche zu neuen Artikulationsformen textiler Gebäudehüllen und zu neuer Anwendbarkeit führen.

Neben den ästhetisch, sinnlich motivierten Eigenschaften ist die Gebäudehülle auch für die Erfüllung einer Reihe von funktionalen Anforderungen verantwortlich. Die Hülle schützt und bewahrt, sie selektiert und atmet, schließt und öffnet zugleich. Sie bildet eine durchlässige Grenze, die nach Hegel als *„schützendes Kleid im Dienst der Lebenserhaltung steht“* [[4] Hegel 1968]. In diesem Sinn müssen textile Gebäudehüllen imstande sein, neben ästhetischen auch statische und bauphysikalische Aufgaben zu erfüllen, was zu großen Herausforderungen führt.

So ist die prinzipiell eher bedingte statische Leistungsfähigkeit von textilen Faltstrukturen in Gebäudehüllen von der Faltungsart anhängig. Längsfaltungen beispielsweise können Lasten nur in eine Richtung abtragen. Facettenfaltungen an sich weisen dagegen überhaupt keine statische Leistungsfähigkeit auf, können jedoch in Kombination mit glatt gespannten Membranen ein mehrlagiges, sehr wohl tragfähiges System bilden.

Im Hinblick auf bauphysikalische Aufgaben stellt sich die Herausforderung, dass oftmals ein Widerspruch besteht, wenn ein Systemaufbau verschiedene Anforderungen zu erfüllen hat, die gegensätzlichen bauphysikalischen Prinzipien folgen. So besitzen textile Konstruktionen durch ihre sehr geringe Masse und ihre biege- weiche Struktur eine geringe schalldämmende Isolierwirkung. Bisherige Ansätze, die schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen zu verbessern, schränken die architektonisch-ästhetischen Qualitäten textiler Konstruktionen in starkem Maße ein. Um die schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen zu ver-

bessern, wird bspw. zusätzliche Masse zugeführt, oder es werden mehrlagige Schichten aufgebaut. Beides führt jedoch zu einer Beeinträchtigung der Lichtdurchlässigkeit der Gebäudehülle. Gleichzeitig ist aber eine ausreichende Lichtdurchlässigkeit im Hinblick auf eine natürliche Raumausleuchtung mit Tageslicht, und somit für die nachhaltige Nutzung eines Gebäudes, von großer Relevanz.

Bei Systemaufbauten, in welchen harte und weiche, leichte und schwere, oder transparente und opake Werkstoffe zusammentreffen, wird deutlich, dass diese Materialzusammenführung besonderer Konstruktionsformen bedarf. Die Anwendung von faltstrukturen bietet eine hervorragende Möglichkeit in diesem Sinn, hocheffiziente Funktionsmaterialien in die biegeweichen Systemaufbauten zu integrieren. So kann die schalldämmende Wirkung verbessert und zugleich eine gute Lichtdurchlässigkeit der textilen Gebäudehülle gewährleistet werden.

Die Lichtdurchlässigkeit ist eine der Kerneigenschaften, die textilen Stoffen zugeschrieben wird. Aus der Vielfalt unterschiedlicher Oberflächenstrukturen und unterschiedlicher Lichtdurchlässigkeiten des Materials – von blickdichten bis hin zu kaum erkennbaren feinen Geweben – lassen sich reizvolle architektonische Oberflächen realisieren. Ihre Wahrnehmung durch den Betrachter hängt grundsätzlich von der Größe der faltstrukturen und von der Betrachtungsdistanz ab. Aus der Ferne betrachtet entstehen quasi geschlossene und homogene Hüllen, die jedoch unter einem anderen Blickwinkel Materialtransluzenz zulassen. Der Wechsel von Licht und Schatten oder von Tag und Nacht belebt die Oberfläche und lässt das Bauwerk auf unterschiedlichste Weise wirken.

Um die Semantik, die Anmutung, und die sinnlichen Qualitäten von textilen Oberflächen bzw. textilen Gebäudehüllen zu erforschen, blickt die vorliegende Arbeit über tradierte Entwurfsmethoden hinaus. Die im weiteren Verlauf der Arbeit vorgenommene konzeptionelle und experimentelle Annäherung an das textile Entwerfen in der Architektur soll die Schaffung neuer Entwurfparameter erlauben. Auf diese Weise können neue Ausgangsbedingungen und erweiterte Freiheitsgrade für das Entwerfen mit Textil geschaffen werden. In diesem Sinn bietet die Erzeugung von faltstrukturen eine besonders vielversprechende Möglichkeit zur Gestaltung textiler Gebäudehüllen, wenn diese zu ästhetischen und funktionalen Qualitäten gleichermaßen beitragen sollen. Mithilfe bestimmter, gezielt eingesetzter ästhetisch wertvoller faltstrukturen kann eine Verbesserung von schalltechnischen Eigenschaften textiler Gebäudehüllen bei gleichzeitiger Erhaltung einer hohen Lichtdurchlässigkeit und Leichtigkeit erreicht werden.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zu erforschen, wie textile Oberflächen mithilfe von Faltstrukturen<sup>1</sup> gestaltet werden können, wenn sie zu ästhetischen Qualitäten und zur Verbesserung der schalltechnischen Eigenschaften textiler Gebäudehüllen bei gleichzeitiger Erhaltung einer hohen Lichttransmission beitragen sollen. Die Arbeit blickt dabei über tradierte Entwurfsmethoden hinaus. Das Ziel der Arbeit erfordert die Beantwortung der folgenden Forschungsfragen:

1. Wie können Faltungen phänomenologisch und architekturtheoretisch eingeordnet werden?

Faltstrukturen bzw. Faltungen als Addition der gleichen Struktur sind in vielen Bereichen des Lebens ein bedeutendes Realweltphänomen – in Natur und Technik, ebenso wie in Kunst, Mode und Design. Ihre Einfachheit und Komplexität zugleich macht es interessant, Faltprinzipien aus der Natur ebenso in die genannten Bereiche wie auch in das Bauwesen zu übertragen. Mit der ersten Forschungsfrage beabsichtigt die Arbeit zum einen, ein grundlegendes Verständnis über die Erscheinungsformen und Wahrnehmungen von Faltungen, ihren Ursprung, und die Motive für ihre Entstehung bzw. ihre Nutzbarmachung zu schaffen. Neben dieser notwendigen phänomenologischen Einordnung soll zum zweiten eine architekturtheoretische Einordnung der Faltung erfolgen, um den architektonischen Diskurs zu gefalteten bzw. ornamentalen Erscheinungsformen nachzuverfolgen. Insgesamt wird so die Grundlage für die weitere Auseinandersetzung mit der Faltung und der Falt-Ornamentik in der Gebäudehülle aus architektonischer Sicht geschaffen.

2. Wie können Faltstrukturen aus architektonischer Sicht systematisiert werden?

Obwohl Falten beim Arbeiten mit Stoff mit gewisser Genialität und Raffinesse in Verbindung gebracht werden, setzt die Textile Architektur in der bislang praktizierten Form nur sehr begrenzt die ästhetischen Möglichkeiten der Oberflächengestaltung durch Faltengenerierung um. Meist handelt es sich um monochrome, knitter- und faltenfreie Oberflächen, bei welchen die Flächenform und ihre Stabilisierung für die ganze Struktur bestimmend sind. Dabei bietet die Oberflächengestal-

---

<sup>1</sup> Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Begriff der Faltstruktur bezeichnet dreidimensionale, reliefartige Oberflächen, welche aus einer Fläche herausgearbeitet und punktuell an ihren Kanten oder einem Knotenpunkt miteinander verbunden sind. Prinzipiell besteht eine Faltstruktur aus mindestens einem aufsteigenden und einem abfallenden Flächenelement (sog. Bergfalte und Talfalte). In Abhängigkeit vom Systemaufbau können Faltstrukturen aus einzelnen Segmentelementen bestehen, welche entlang der Faltkanten entweder über starre oder bewegliche Komponenten zusammengefügt werden. Eine Addition bzw. Aneinanderreihung der gleichen Struktur wird als Faltung bezeichnet. Insofern kann hinsichtlich zahlreicher Fragestellungen ohne Unterschied auf Faltstrukturen und Faltungen Bezug genommen werden.

tung durch Faltgenerierung ein fast unerschöpfliches Spektrum an neuen Erscheinungsformen für textile Hüllen. Sie ist zudem eine bewährte Methode zur materialgerechten Gestaltung von textilen Oberflächen bei gleichzeitiger Integration funktionaler Aspekte. Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in der fehlenden, wissenschaftlich fundierten Systematisierung von möglichen Faltformen aus Sicht der Architektur. Der Autorin ist keine wissenschaftlich fundierte Abhandlung bekannt, die Faltstrukturen in der Architektur systematisch beschreibt und einordnet. Eine solche Systematisierung von Faltstrukturen kann eine Art Entwurfshilfe darstellen, mit der die wesentlichen Merkmale von Faltstrukturen und ihre Ausprägungen erkannt und analysiert werden können, sodass beim Entwerfen bzw. Gestalten zielorientiert vorgegangen werden kann.

3. Welche Faltstrukturen lassen sich auf textile Werkstoffe in der Architektur und somit auf textile Gebäudehüllen übertragen?

Die Vielfalt möglicher Faltenkombinationen ist beinahe grenzenlos. Insofern stellt sich die Frage, inwieweit sich welche Faltenstrukturen auf textile Werkstoffe, die in der Architektur verwendet werden, und somit auf textile Gebäudehüllen, übertragen lassen. Da hierfür nahezu keine Referenzen vorhanden sind, wird die Formwelt und das Verständnis von Geometrie und Steifigkeit von Faltstrukturen auf experimentellem Weg in der vorliegenden Arbeit erfasst. So lassen sich Faltstrukturen, die sich potentiell auf die textile Gebäudehülle applizieren lassen, ausloten, sowie ihre Erscheinungsformen im Hinblick auf die Ästhetik diskutieren. Anhand der bei den Gestaltungsstudien erzeugten Faltstrukturen soll demonstriert werden, wie mithilfe lokaler Manipulationen und Selbstbildungsprozesse die raumbildenden Eigenschaften und die stabilisierende Wirkung eines Textils gesteigert werden können, ohne dass die komplexe Oberflächenartikulation zu einem komplizierten Konstruktionsverfahren führt. Diese Wechselbeziehungen zwischen Funktion und Form sowie Struktur und Performance (Wirkung) führen zu einem Materialsystem, das die Fähigkeit besitzt, sowohl bauphysikalische Anforderungen als auch synästhetische Erlebnisse miteinander zu verbinden. In diesem Sinn steigern Faltstrukturen das performative Potenzial einer textilen Gebäudehülle. Der Begriff der Performanz deutet darauf hin, dass die textile Gebäudehülle Funktion und Repräsentation verbindet. Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle sollen nicht nur technisch-konstruktiv fungieren, sondern gleichzeitig eine Geschichte erzählen.

4. Welche Faltstrukturen tragen zur Verbesserung der schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen bei?

Wie bereits ausgeführt ist es notwendig, die Strukturierung der textilen Oberfläche über ästhetische Aspekte hinaus auch für die Erfüllung funktionaler Anforderun-

gen an die Gebäudehülle zu nutzen. Denn aus bauphysikalischer Sicht weisen textile Konstruktionen gegenüber den herkömmlichen, massiven Konstruktionen deutliche Defizite auf. Aufgrund der geringen flächenbezogenen Masse, der geringen Materialdicke und der hohen Biegeweichheit der Oberflächen zeigen textile Gebäudehüllen insbesondere eine unzureichende schalldämmende Wirkung auf. Daher adressiert die vorliegende Forschungsfrage die schalldämmenden Eigenschaften von Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle. Konkret soll untersucht werden, welche der Faltstrukturen, die sich auf textile Werkstoffe übertragen lassen, zur Verbesserung der schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen beitragen. Dabei werden auch die unterschiedlichen Geometrien von Faltstrukturen diskutiert, welche sich mit Funktionsmaterialien befüllen lassen.

5. Inwieweit können Faltstrukturen schalltechnisch aktiviert werden, ohne dabei die Lichtdurchlässigkeit der Oberfläche zu beeinträchtigen?

Übliche Ansätze in der Praxis, die schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen zu verbessern, basieren auf Erhöhung der Masse – bspw. durch Sandfüllung. Diese Lösungsansätze werden als zwei- bzw. mehrschalige Aufbausysteme oder als Multilayer-Aufbausysteme mit integrierten schweren Mittellagen in den Schichtaufbauten ausgeführt. Zwar verbessern die genannten Ansätze die Schalldämmwerte um mehrere Dezibel, führen aber im Bereich der Lichtdurchlässigkeit zu immanenten Nachteilen. Dadurch schränken sie die architektonisch-ästhetische Qualität textiler Konstruktionen in einem wesentlichen Ausmaß ein – denn diese ist gerade durch Lichtdurchlässigkeit und Leichtigkeit geprägt. Daher widmet sich die vorliegende Forschungsfrage der Suche nach Systemlösungen für Faltstrukturen, welche zur Verbesserung der schalltechnischen Eigenschaften textiler Gebäudehüllen bei gleichzeitiger Erhaltung einer hohen Lichttransmission und Ästhetik beitragen. Konkret soll untersucht werden, welche Geometrien der Faltstrukturen sich positiv auf die schalldämmenden Eigenschaften der Hülle auswirken. Zudem stellt sich die Frage, inwieweit die Befüllung von Faltstrukturen mit geeigneten, d.h. transluzenten und leichten Funktionsmaterialien, die schalldämmenden Eigenschaften der Hülle positiv beeinflussen kann, ohne dabei die Lichtdurchlässigkeit und Leichtigkeit der Konstruktion einzuschränken.

6. Welche neuen Entwurfsansätze gehen einher mit der Anwendung von Faltstrukturen bei textilen Gebäudehüllen?

Die mit der textilen Gebäudehülle einhergehende Entbindung der Außenhaut von ihrer statischen Funktion führt beinahe zwangsläufig dazu, ihre Oberfläche neu zu gestalten. Daher geht die vorliegende Arbeit Entwurfsansätzen nach, die aus der Anwendung von Faltstrukturen heraus resultieren. Textile Oberflächen mit einem

präzise arrangierten Faltenwurf können nicht nur die ästhetischen Qualitäten des Stoffes hervorheben, sondern ermöglichen zugleich eine verbesserte Integration weiterer Funktionen. Durch die Verschmelzung von Ästhetik und Funktionalität im Sinne einer neuen „*Ästhetik des Nützlichen*“ [[5] Winkler 2002] kann das Bauen mit Textil mehr Anwendung und Akzeptanz in der Architektur erfahren. Dies bedingt jedoch die Erweiterung tradierter Entwurfsmethoden für das Entwerfen textiler Konstruktionen.

### 1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit

Den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit bildet eine phänomenologische und architekturtheoretische Auseinandersetzung mit der Faltung in Kapitel 2 (Forschungsfrage 1). Die phänomenologische Betrachtung geht von der Natur aus, wo die Faltung als generelles Organisationsprinzip bei der Gestaltung von Organismen zu beobachten ist, und schließt bewusst der Architektur angrenzende Themengebiete wie Leichtbau, Kunst, Mode und Design mit ein. Die architekturtheoretische Einordnung der Faltung in der Gebäudehülle beginnt bei dem wegweisenden theoretischen Beitrag von Semper mit seinem Prinzip der Bekleidung. Weitere weitreichende Impulse liefert die Debatte um die Frage des Ornaments in der Architektur, die ebenfalls thematisiert wird – beginnend bei Loos bis hin zur Diskussion zeitgenössischer Tendenzen. Schließlich wird auf den Beitrag von Gilles Deleuze eingegangen, der das zeitgenössische Verständnis der Faltung in der Architekturtheorie mitbeeinflusst hat.

In Kapitel 3 werden Faltstrukturen aus architektonischer Sicht systematisiert (Forschungsfrage 2), wobei auf Erkenntnisse aus anderen Disziplinen zurückgegriffen wird. Die Systematisierung erfolgt tabellarisch in Form eines Morphologischen Kastens. Mit dieser Darstellungsform können die bestimmenden Merkmale von Faltstrukturen aus architektonischer Sicht und ihre Ausprägungen leicht ersichtlich werden. (Zielführende) Kombinationen der Merkmalsausprägungen legen schließlich die zahlreichen Erscheinungsformen von Faltstrukturen für textile Gebäudehüllen offen.

Kapitel 4 widmet sich der Frage, inwieweit sich welche Faltstrukturen auf textile Werkstoffe in der Architektur und somit auf textile Gebäudehüllen übertragen lassen (Forschungsfrage 3). Um in diesem Zusammenhang die Besonderheiten textiler Werkstoffe im Hinblick auf die Umsetzung von Faltstrukturen zu verstehen, werden zunächst die wesentlichen Materialeigenschaften thematisiert. Anschließend erfolgt die Untersuchung von Möglichkeiten zur Faltenbildung und Formstabilisierung textiler Werkstoffe auf experimentellem Weg. Hierzu werden ausgewählte Faltstrukturen als Prototypen umgesetzt. Beschichtetes und unbeschichtetes PTFE-Gewebe, sowie PVC-beschichtetes Polyestergewebe bildeten dafür die Materialba-

sis. Die Wahl der Faltstrukturen erfolgt unter der Prämisse, mit möglichst einfachen Herstellungsmethoden ästhetisch interessante Faltgeometrien zu erzeugen, dessen Strukturformen sich besonders gut für die äußere Gebäudehülle eignen.

Kapitel 5 zeigt auf Basis schalltechnischer Untersuchungen Faltstrukturen auf, die zur Verbesserung der schalltechnischen Eigenschaften textiler Gebäudehüllen beitragen können (Forschungsfrage 4). Forschungsleitend für diese schalltechnischen Untersuchungen ist die Analyse ausgewählter Faltstrukturen mit unterschiedlichen geometrischen Grundmustern aus Kap. 4 – im ursprünglichen Zustand (unbefüllt) sowie befüllt mit Aerogel- und Polycarbonat-Granulat. Die Ermittlung der Schalldämm-Maße der ausgewählten Probekörper ist nach DIN EN 10140 in einem Akustiklabor durchgeführt.

In Kapitel 6 wird die Lichtdurchlässigkeit ausgewählter und mit geeigneten Funktionsmaterialien befüllter Faltstrukturen experimentell untersucht. Vor dem Hintergrund der Fragestellung, wie Faltstrukturen schalltechnisch aktiviert werden können, ohne dabei die Lichtdurchlässigkeit der Oberfläche zu beeinträchtigen (Forschungsfrage 5), werden solare Transmissionswerte der Probekörper mit einem Pyranometer gemessen und ausgewertet.

Kapitel 7 geht auf neue Entwurfsaspekte ein, die mit der Anwendung von Faltstrukturen bei textilen Gebäudehüllen einhergehen (Forschungsfrage 6). Dabei wird mit der Darstellung tradiertter Entwurfsgrundlagen und der Entkopplung der Hüll- von der Tragfunktion auf bisherige Entwurfsansätze beim Bauen mit Textil eingegangen. Ausgehend hiervon werden auf Basis der Erkenntnisse der Arbeit aus den Kapiteln 2 bis 6 die neuen Entwurfsaspekte abgeleitet.

Kapitel 8 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammen: Faltstrukturen erhöhen die visuellen und haptischen Oberflächenqualitäten und können die schalldämmende Eigenschaften textiler Gebäudehüllen – unter Berücksichtigung von Leichtigkeit und Transluzenz – erheblich verbessern. Abschließend wird auf Limitationen der Arbeit und den weiteren Forschungsbedarf eingegangen.

## **2 Phänomenologische und architekturtheoretische Einordnung der Faltung**

Die Falte und ihre prozessuale Verlaufsform – die Faltung – sind als Realweltphänomen in vielen Bereichen des Lebens von erheblicher Bedeutung. Die Einfachheit und zugleich Komplexität dieses Phänomens findet sich in der gesamten Natur, ebenso wie in verschiedenen Lebensbereichen des Menschen, wieder. Die phänomenologische Einordnung der Faltung in Kap. 2.1 beginnt bei der Natur, wo die Faltung als generelles Organisationsprinzip bei der Gestaltung von Organismen zu beobachten ist und über die Bionik in zahlreiche Felder der Technik übertragen wird. Der Faltenwurf in der Mode bringt den schmückenden Charakter in den Stoff und ermöglicht Beweglichkeit und Bequemlichkeit. Im Produktdesign dient er der Erfüllung von diversen spezifischen Gebrauchsfunktionen eines Produktes und der Verbesserung seiner ästhetischen Wirkung. In der bildenden Kunst ist die Faltung ein künstlerisches Sprachmittel des seelischen Ausdrucks, das im Barock seinen Höhepunkt fand. Schließlich interessieren sich im Bereich des Bauwesens gleichermaßen Architekten wie Ingenieure für Faltungen wegen ihrer technisch-konstruktiven und räumlich-plastischen Wirkung.

Faltstrukturen in der Gebäudehülle stellen eine Art Ornamentensystem dar, mit dem das Gebäude eingekleidet wird. Daher beginnt die architekturtheoretische Betrachtung der Faltung in Kap. 2.2 bei Gottfried Semper, der die Hülle (das Gewand) als ein nichttragendes Element darstellte, welchem die Leichtigkeit des Stoffes bzw. des Vorhangs innewohnt und das auf den handwerklich-ornamentalen Strukturprinzipien von Textilien beruht [[2] Semper 1860]. Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle generieren eine ornamentale Oberflächenerscheinung, die keineswegs die Art von Ornamenten darstellt, die Adolf Loos kritisierte und als Zeichen der Degeneration bezeichnete. Schließlich entwickelte sich in den frühen 1990er Jahren ein reger architekturtheoretischer Diskurs um den Begriff der Faltung. Wichtige Impulse lieferte dabei der französische Philosoph Gilles Deleuze. Nicht zuletzt aus diesem Diskurs hervorgegangene, zeitgenössische Tendenzen spiegeln eine klare Wertschätzung der Oberfläche, der materiellen Authentizität und der Kunst der Gestaltung wider. Dabei bilden Konstruktion, Material und Struktur eine Einheit.

### **2.1 Das Phänomen der Faltung**

Die in Kap. 2.1 vorgenommene phänomenologische Einordnung der Faltung bezieht sich auf die reale Anwendung unterschiedlicher Faltungen. In philosophischer Hinsicht wird die Faltung nicht näher betrachtet.

### 2.1.1 Faltung in Natur und Technik

Faltung bezeichnet in der Strukturgeologie die Zusammenstauchung oder Verformung von Gesteinsschichten infolge von seitlichem Druck. Durch die Faltungen entstehen unterschiedliche Gesteinsformationen, die sich zu regelrechten Mulden oder Gebirgen aufwerfen können. Je nach Form unterscheidet man Knickfalten, Biegefalten oder Fließfalten. Die Faltenformen Sattel (Antiform) und Mulde (Synform) sind abhängig von der Mächtigkeit des verfalteten Schichtpaketes, den mechanischen Eigenschaften des Gesteins, dem Vorhandensein von Abscherflächen und den auftretenden Spannungen [[6] Burg 2001].

In der Biologie gilt die Faltung als Antwort der Natur auf vielfältige Anforderungen. So bedeutet der Begriff der „*Evolution*“ nichts anders als „*Entfaltung*“. Die organisierte Faltenbildung in der Natur dient der Anpassung an die Umwelt und entsteht oft aus mechanischer Notwendigkeit heraus. Zudem findet man Faltstrukturen dort, wo Wachstum und Entwicklung stattfinden, wo Platz gespart werden muss oder etwas zu schützen ist. Überdies entstehen Faltungen in Belastungssituationen als generelles Organisationsprinzip der Natur [[7] Büchel/Nachtigall 2000]. All diese zentralen Motive für Faltenbildung sind bei der Gestaltung von Organismen zu beobachten und korrespondieren mit den drei Falprinzipien Versteifen, Verstauen und Bewegen:

- Versteifen: Faltenbildung bei Organismen, wenn eine Struktur ausgesteift werden soll (z. B. in Gräsern oder Halmen);
- Verstauen: Faltenbildung bei Organismen, wenn Funktionsprozesse zwar eine große Oberfläche benötigen, die Außenform aber möglichst kompakt sein soll (z. B. Gehirn oder Darm) oder großflächige Elemente auf kleinem Raum verstaut werden sollen;
- Bewegen: Faltenbildung bei Organismen, wenn eine Bewegung eingeleitet werden soll (Kontraktion und Entspannung eines Muskels ist nichts anderes als ein ständiges Zusammenfalten und Entfalten von Strukturen).

Die drei Falprinzipien – Versteifen, Verstauen und Bewegen – können anhand eines Schmetterlingsflügels gut illustriert werden: häufig durch Faltung versteift, kann er platzsparend eingefaltet werden und wird meist zum Flug entfaltet und im Flug hin und her gefaltet, weshalb der Schmetterling auch Falter genannt wird [[8] Archplus 131 1996].

Die Bionik als technische Anwendung der Biologie hat zum Ziel, Prinzipien der Natur für technische Systeme nutzbar zu machen, so u.a. auch Falprinzipien. Bei vielen technischen Systemen werden platzsparende Faltungen realisiert, wenn große Flächen und Formen durch Faltung auf eine kompakte, transportable Größe reduziert werden sollen. Eine der bekanntesten platzsparenden Faltungen wurde von

dem japanischen Astrophysiker Koryo Miura im Jahr 1995 für den Satellitenbau entwickelt. Das faltbare Solarpanel lässt sich auf die Größe seines einzelnen Segmentes zusammenfallen und im Orbit mit nur einer Bewegung entfalten [9] Hungerbühler 2013]. Auch Brian Trease entwickelte bei der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA zusammen mit dem Origamikünstler Robert Lang eine großflächige Faltstruktur. Der „Starshade“ soll für bestimmte astrophysische Zwecke das Licht eines Sterns abschirmen. Zunächst möglichst platzsparend verpackt entfaltet er sich im Weltraum zu einer Länge von 34 m.

Ein weiteres Anwendungsfeld für origamiartige Faltstrukturen ist der Leichtbau und dabei insbesondere der Flugzeugbau. Multifunktionale Faltwabenstrukturen können je nach Anforderungsprofil unterschiedliche Geometrien aufweisen und ein 30-40% geringeres Gewicht erreichen, was beim Flugzeugbau zu enormem Einsparpotential beim Treibstoff führt. Neben der Gewichtsoptimierung ist die Luftdurchlässigkeit einer Faltwabenstruktur beim Flugzeugbau interessant. Aufgrund des durchgängigen Hohlraums bleibt die Faltwabenstruktur durchluftbar, sodass Wasserdampfkondensat durch die Wabe abgeleitet werden kann. Schließlich weisen Faltwabenstrukturen plastische Verformbarkeit auf, die durch das Ritz-Faltverfahren ermöglicht wird [[10] Sauer 2010]. In [[11] Klett 2013] werden die Auslegung multifunktionaler isometrischer Faltstrukturen für den technischen Einsatz untersucht, sowie Simulationswerkzeuge für kinematische Faltvorgänge vorgestellt.

Der Automobilbau und die Medizin stellen weitere zentrale Anwendungsfelder dar, die Faltprinzipien der Natur für ihre technischen Systeme nutzbar machen. So kommen im Automobilbau beim Design von Knautschzonen und von Airbags verschiedene Falttechniken zum Einsatz. Airbags werden so zusammengelegt, dass sie möglichst wenig Platz einnehmen, sich aber dennoch innerhalb von Sekundenbruchteilen vollständig und zuverlässig entfalten können. In [[12] Mao 2001] werden Auswirkungen unterschiedlicher Gewebefaltungen auf das Gefährdungs- und Schutzpotenzial von Airbags untersucht. Die Medizin nutzt das Prinzip des Zusammenfaltens und Entfaltens beispielweise bei der Behandlung von Arteriosklerose. Hier werden sogenannte Stents endoskopisch in verengte Blutgefäße eingebracht, um sie von innen zu stützen. Der zusammengefaltete Stent entfaltet sich in einer verengten Arterie durch Einfluss der Körpertemperatur von selbst und erreicht dabei das Fünffache seiner ursprünglichen Größe [[9] Hungerbühler 2013].

Ein nicht nur für die Bionik wichtiger Zugang zu komplexen Sachverhalten ist der über das Verständnis komplexer, dynamischer Systeme (bspw. Systemische Bionik). Faltung steht paradigmatisch für dieses relativ neue naturwissenschaftliche Verständnis der Komplexität – so entspricht lat. *complicare* dem Falten bzw. Zusammenfallen. In der Faltung liegt das generative Prinzip komplexer, dynamischer

Systeme, bei welchen verschiedenste Einflussgrößen zusammenwirken, d.h. gleichsam ineinander gefaltet sind. Daher spricht man bei der Beschreibung komplexer, dynamischer Systeme ganz explizit von Faltung der bestimmenden Funktionen. In der visuellen Darstellung derartiger Systeme taucht folglich das Bild der Faltung immer wieder auf. Beispielsweise bestehen Fraktale aus unendlich vielen Faltungen, deren Charakteristikum die Selbstähnlichkeit ist. Unabhängig davon, wie stark ein Fraktal vergrößert wird, erhält man stets eine Struktur mit immer feineren Faltungen. [[8] Archplus 131 1996].

### 2.1.2 Faltung in Mode, Design und Kunst

Die Faltung wird in der Kleidermode mit dem Begriff Plissee (von frz. „pli“ – Falte; „plisser“ – falten, in Falten legen) bezeichnet [[13] Schirbaum 1993]. Das Plissieren von Stoffen ist eine Technik, die es ermöglicht, in einem flachen Textilgewebe dreidimensionale Faltstrukturen einzuarbeiten. Die wechselhafte Beliebtheit und Verbreitung von Plissees ergeben aufschlussreiche Einblicke in die Sozial- und Kulturgeschichte. Die ersten Plissees wurden bereits vor über 2000 Jahren im alten Ägypten erstellt, um die Gewänder der Reichen zu verschönern. Bis in das späte Mittelalter hinein blieb Plissee nur den Wohlhabenden vorbehalten. Insbesondere plissierte Kragen (Maria-Stewart-Kragen) waren im Mittelalter bekannt. Im 18. und 19. Jahrhundert wurden Faltungen vor allem bei Trachten eingesetzt. Erst mit der industriellen Revolution, in deren Rahmen kostengünstige Plisseeverfahren entwickelt wurden, konnte Plisseemode auch in breiteren Schichten Einzug halten. Einhergehend mit der Etablierung industrieller Massenkönfektion nach dem Zweiten Weltkrieg entstanden auch industrielle Plisseebetriebe [[14] Lassner 2013].

Auf der Suche nach einzigartigen Konzepten für die Kleidung bieten Faltenarrangements eine große Vielfalt an Variationen und Möglichkeiten. Faltungen werden in allen Moderichtungen mit einer gewissen Genialität und Raffinesse in Verbindung gebracht.

Mariano Fortuny (1871-1949, span. Modeschöpfer) erfand das unregelmäßige Plissee für seine zeitlosen „Delphos“- Kleider. Die bodenlangen Kleider, benannt nach der Statue des Wagenlenkers von Delphi aus der Antike, glichen in ihrem Stil den griechischen Chitons. Gefertigt aus hauchdünnem, extrem fein plissiertem Seidengewebe wogen sie nur etwa 150 Gramm pro Stück [[15] Loschek 2007]. Die Entwürfe von Fortuny verhüllten den Körper nicht, sondern folgten dessen Formen. Modellierend wirken ebenfalls die Kreationen von Madame Grès (1903-1993, fr. Modedesignerin). Sie entwarf ähnlich wie Mariano Fortuny Kleider im Stil der griechischen Antike, die als Vorreiter des heutigen Minimalismus gesehen werden können (siehe Abb. 2.1). Die Modedesignerin gilt als eine der wegweisenden Gestalterinnen

der Haute Couture – berühmt für ihre plissierten, üppigen Stoffvolumen und ihre asymmetrischen Schnitte [[16] Mears 2008].

Einen anderen Ansatz bei Faltenarrangements verfolgt Roberto Capucci (1930 it. Modedesigner). Mithilfe von Faltungen in variierenden Formen, nämlich als Raffungen, Rüschen und Bauschungen (Ab. 2.2), modelliert er Kleider zu skulpturalen und theatralischen Raumfiguren aus Stoff [[17] Blum 2011]. Ebenfalls wie textile Strukturen wirken die Arbeiten der dänischen Textildesignerin Thea Bjerg. Mithilfe von Lasercutting und Ultraschalltechnik formiert sie Faltstrukturen aus leichten und transparenten Polyesterstoffen (Abb. 2.3) [[18] Quinn 2004].



**Abbildung 2.1** Falten bei Madame Grès, Paris 1962, aus [16]

**Abbildung 2.2** Falten bei Roberto Capucci, Rom 1992, aus [17]

**Abbildung 2.3** Falten bei Thea Bjerg, Kopenhagen 2006, aus [28]

**Abbildung 2.4** Falten bei Issey Miyake, Tokyo 2015, aus [19]

Interessante Aspekte von Falten charakterisiert die Mode von Issey Miyake (1938 jap. Modeschöpfer), der zu den wichtigsten Falten-Experimentatoren zählt. Mit der Kollektion „*Pleats Please*“ entwickelt er in den 1990er Jahren eine neue Philosophie der Kleidung, bei der es vor allem um die geistige Unabhängigkeit und Freiheit der Avantgarde-Frau geht, die auch Bewegungsfreiheit einschließt. Seine Mode kreiert er zu „*achtzigprozentigen Entwürfen*“, denn den Rest des Designs überlässt Miyake der Trägerin, um ihr die Freiheit der Bequemlichkeit zu geben. Es sind die Falten, die die angestrebte Bewegungsfreiheit ermöglichen und die Basis für weitere Effekte bilden (siehe Abb. 2.4). Die Kleidungsstücke aus geknitterten und gefalteten Polyesterstoffen werden zunächst zugeschnitten und zusammengesetzt. Anschließend erfolgt das Pressen der Falten in verschiedenen Winkeln und Diagonalen. Miyakes „*Pleats*“ sind sehr leicht, kompakt und pflegeleicht. Sie lassen sich jedem Modegeschmack und Anlass anpassen und werden in dieser Hinsicht als „*smart clothes*“ bzw. intelligente Kleider verstanden [[19] Kitamura 2012].



**Abbildung 2.5** Leichtes Polyester mit feinen und unregelmäßigen Plisseefalten aus der Kollektion „Pleats Please“ von Issey Miyake, aus [19]

Die Faltprinzipien der Natur führen auch im Produktdesign zu effizienten und originellen Lösungen. Analog zu Anwendungen im Leichtbau dient auch hier die Faltung von extrem dünnwandigen Materialien der konstruktiven Versteifung, um leichte und belastbare Konstruktionen zu bilden. Wird dabei die Falte nicht nur als Versteifung sondern zusätzlich als Gelenk genutzt, können Faltobjekte auf eine wesentlich kleinere Größe komprimiert werden. Die Faltung im Produktdesign dient zudem oftmals auch der Erfüllung der spezifischen Gebrauchsfunktionen des Produktes. So steuert die Ziehharmonika-Faltung bei Musikinstrumenten den Luftstrom, dient bei der Balgenkamera zur Entfernungsregulierung und fungiert beim Faltenbalg als Puffer und gleichzeitig Mittel zur Überbrückung etwaiger Krümmungen [[9] Hungerbühler 2013].

Neben der Adressierung von funktionalen Aspekten werden Faltungen im Produktdesign zur Verbesserung der ästhetischen Wirkung von Objekten eingesetzt. So ist die Faltung bspw. ein beliebtes Gestaltungselement beim Stuhldesign. In den 1980-er Jahren konzipierte Frank Gehry die Möbelserie „Easy Edges“ aus Wellpappe. Sein „Wiggle Side Chair“ basiert auf einer ondulierenden Faltung und innovativen Verarbeitungsmethoden im Umgang mit der Wellpappe [[20] Schmidt/Stattmann 2009]. Die Faltung erzeugt große Wirkung nicht nur hinsichtlich der Stabilität der Möbel und der Möglichkeiten des Zusammenklappens, sondern ergibt spannungsvolle Erscheinungsformen, die sich auf fast jedes Material übertragen lassen.

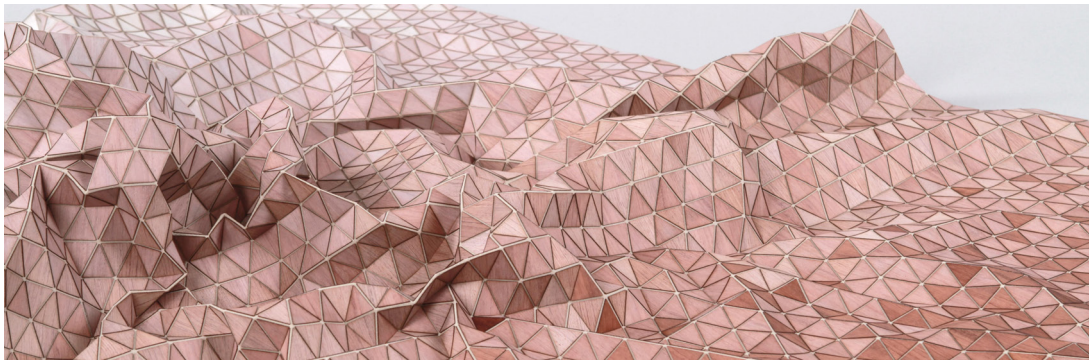
Eine nahezu unerschöpfliche Inspirationsquelle für Produktdesigner, aber auch andere Gruppen wie Künstler und Architekten, stellt *Origami* dar. Diese japanische Kunst des Papierfaltens ist eine hochästhetische Synthese aus strukturierter, ordnender Vorstellungskraft und handwerklichem Geschick. Ethnologisch leitet sich das Wort Origami aus dem japanischen *oru* für falten und *kami* für Papier. In diesem Sinn ist Origami eine Faltkunst auf Basis von Papier, die sich mit figürlichen Darstellungen von natürlichen oder geometrischen Objekten beschäftigt. Sie kam im sechsten Jahrhundert n. Chr. auf, als chinesische Mönche Papier nach Japan brachten. Zunächst wurde das teure Papier als Luxusgut betrachtet, sodass der

Umgang damit in Form von Origami-Faltungen ein Ausdruck aristokratischer Distinguiertheit war.

Heutzutage ist Origami ein sehr weitreichendes Kunstgebiet mit einer Vielzahl von Faltechniken und einer unbegrenzten Anzahl an Faltmustern. Dies wurde v.a. durch die Entwicklung der Standard-Codierung durch Akira Yoshizawa (1911-2005, jap. Faltkünstler) begünstigt. Damit können allgemein verständliche Faltanleitungen erstellt und beliebig weitergegeben werden. Wegweisend sind zudem die Arbeiten von Robert J. Lang, Tom Hull, Martin und Eric Demaine, sowie Robert Geretschläger [[9] Hungerbühler 2013]. Grundsätzlich können drei Gattungen von Origami unterschieden werden – klassisches, modulares und Mosaik-Origami.

- Klassisches Origami beschäftigt sich hauptsächlich mit figürlichen Darstellungen von Tieren, Menschen, Pflanzen und Objekten. Ausgehend von einem quadratischen Stück Papier wird ohne Verwendung von Schere und Klebstoff eine Figur gefaltet. Eine große Auswahl von Grundmustern, aus welchen immer wieder neue Figuren abgeleitet werden können, ist bspw. in [[21] Kenneway 1991] zu finden.
- Modulares Origami bildet ausschließlich geometrische Figuren wie z.B. Polyeder, Tetraeder, räumliche Gitterstrukturen oder Darstellungen von Molekülen ab. Die geometrische Figur setzt sich aus mehreren gleichen Komponenten zusammen, die ineinander gesteckt oder geklebt werden.
- Mosaik-Origami (auch Tessellations genannt) sind ebenfalls rein geometrisch. Ausgangspunkt sind zweidimensionale geometrische Muster, welche auf das Papier aufgezeichnet werden und gefaltet ein räumliches Muster ergeben. Die Muster können aneinandergefügt werden und erlauben so eine beliebige Wiederholung sowie unzählige Gesamtformen – analog zu einem Mosaik.

Inspiziert durch die Kunst des (Mosaik-) Origami entwickelte die Designerin Elena Strozyk eine neue Materialkombination aus Holz und Textil (siehe Abb. 2.6). In ihrem Materialexperiment untersucht sie, inwieweit Holz textile Eigenschaften annehmen kann und damit sowohl starr wie beweglich sein kann. Je nach Schnittgeometrie können aus der Materialkombination formbare, dreidimensionale Oberflächen entstehen, die sich für das Produktdesign von Teppichen, Decken, Leuchten usw. verwenden lassen [[10] Sauer 2010].



**Abbildung 2.6** „Wooden Textiles“ Collection von Elisa Strozyk, aus [12]

In der Geschichte der bildenden Kunst haben Faltstrukturen in Stoffen und Geweben die Künstler immer fasziniert. Von der Antike bis hin zur Kunst der Gegenwart sind Stoffstrukturen wie Faltenwürfe, Plissees und Draperien ein bedeutender Bestandteil von Gemälden, Fresken, Reliefs und Skulpturen. Sie sind ein Ausdruck von Emotionen und verhaltener Dramatik [[22] Barten 1995]. Auf Gemälden erweckt die plastische Darstellung stofflicher Gewänder eine gewisse Bewunderung und verhilft dem Betrachter unbewusst, den seelischen Zustand im Gemälde wahrzunehmen – wie bspw. beim faltenreichen Gewand des Christi von Albrecht Dürer (1471-1528, dt. Maler) aus dem Jahr 1508 (siehe Abb. 2.7).

Leonardo da Vinci schreibt in „*Trattato della pittura*“ zum Faltenwurf: *„Die Falten der Gewänder, mit denen die Gestalten bekleidet sind, müssen so angeordnet sein, dass sie sich um die Glieder schmiegen, die sie bekleiden, [...] Und das Tuch soll so drapiert werden, dass es nicht unbewohnt aussieht, das heißt, dass es nicht aussieht wie eine Faltendrapierung, in der kein Mensch steckt“* [[23] da Vinci um 1500]. Was da Vinci auf Bekleidungsfallen bezieht und mit *„dass es nicht unbewohnt aussieht“* zum Ausdruck bringt, wurde im Barock als Bedeutungsträger bezeichnet, welche die Gestalt des Körpers und die geistige Kraft vermitteln. Faltungen wurden nicht nur als bloße Materialdekore betrachtet, sondern unter anderem als autonome Elemente, mit deren Hilfe man geistige Werte zum Ausdruck brachte. Deleuze differenziert Faltungen des Barocks nach zwei Richtungen: Faltungen der Materie und Faltungen in der Seele. Die Arbeiten von Gian Lorenzo Bernini (1599-1680, it. Baumeister und Bildhauer) spiegeln diese Zweideutigkeit wieder (Abb. 2.8). Bernini komponiert bei seinen Marmorskulpturen Gewandfalten so, *„dass sie die Intensität einer geistigen Kraft ausdrücken, die auf den Körper wirkt, entweder um ihn zu verkehren oder um ihn wieder aufzurichten oder zu erheben, immer aber, um ihn umzudrehen und das Innere daran zu Geltung zu bringen“* [[24] Deleuze 1988]. Die Metaphysik der Kleiderfalten ist die Idee der Hoffnung auf die Erweiterung des Körpers. Deleuze spricht auch vom dritten Element, das zwischen Körper und Kleiderfalten entsteht und verweist darauf, dass Wasser, Luft, Feuer und Erde in sich selbst unendliche Falten sind [[24] Deleuze 1988].

Im 20. Jahrhundert wurden Faltungen zu einem völlig anderen, neuen Ausdrucksmittel für Künstler, die Um- und Verhüllung von Objekten thematisierten. Man Ray (1890-1976, amer. Künstler) umhüllte und umschnürte im Jahr 1920 eine Nähmaschine mit einer Stoffdecke. Das fotografierte Objekt „*L'énigme d'Isidore Ducasse*“ (dt. „*Das Rätsel des Isidore Ducasse*“) weckte großes Interesse an verborgenen Formen und gefalteten Stoffoberflächen [[22] Barten 1995]. Das Künstlerpaar Christo und Jeanne-Claude inszenierte im Jahr 1995 bei der Verhüllung des Reichstags mit Gewebbahnen ihren bewusst gestalteten Akt des textilen Einhüllens. Nach Christo haben „*Stoffbahnen – wie die Kleidung und die Haut –[...] etwas Zartes und Empfindliches, sie verdeutlichen die einzigartige Qualität des Vergänglichen.*“ [[26] Baal-Teshuva 1995]. Durch das textile Einhüllen als Akt bzw. Prozess vollzieht sich eine formale Änderung der Architektur bezüglich Proportion, Volumen, Maßstäblichkeit und Materialität. Mittels des Verhüllungsmaterials und der gezielt eingesetzten Faltung entsteht ein imaginäres Objekt, welches, indem es auf etwas Darunterliegendes verweist, dieses zugleich überfremdet (Abb. 2.9). Die Verhüllung wird für einen kurzen Moment zum Bild einer ästhetischen Erfahrung, die viele Bedeutungen zulässt.



**Abbildung 2.7** Gewandstudie zum „Heller-Altar“, Albrecht Dürer, 1508

**Abbildung 2.8** Skulptur „*Die Verückung der heiligen Teresia*“, Gian Lorenzo Bernini, 1652

**Abbildung 2.9** Verhüllter Reichstag, Berlin, Christo und Jeanne-Claude, 1995

In jüngster Zeit stehen Faltungen im Fokus einer Reihe von Ausstellungsprojekten. Besonders Faltenwürfe im Kontext der zeitgenössischen Mode und Textilkunst sind ein beliebtes Thema. Einen bedeutenden Überblick zu diesem Thema präsentierte die Ausstellung „*Die Falte. Ein Konstitutivum menschlicher Kleidung?*“ aus dem Jahr 1978, die das Institut für Kostümkunde an der Hochschule für Angewandte Kunst in Wien veranstaltete. Die ausgestellten, faltenreichen Stoffe ergaben aufschlussreiche Einblicke in die Sozial- und Kulturgeschichte der europäischen Modehäuser – von der höfischen Kleidung um das Jahr 1500 bis hin zur Pariser Haute-Couture der Gegenwart. Der begleitende Katalog geht über einen gewöhnlichen Ausstellungskatalog hinaus. So gehören zum Inhalt auch kostümgeschichtliche Untersuchungen einschließlich einer Falten-Zeittafel und eines Falten-Glossars [[26] Wagner 1987].

In der thematisch weit gefassten Vernissage des Museums Bellerive in Zürich wurden im Jahr 1995 unter dem Titel *Starke Falten* faszinierende Phänomene rund um Faltstrukturen in den Vordergrund gestellt – allen voran Rhythmus, Bewegung, Öffnen, Verbergen, Modellierung und Reichtum [[22] Barten 1995]. Die schwarz-weißen Fotografien der Gewänder verschleierter Frauen aus Marokko von Gaëtan Gatian de Clérambault (1872-1934, fr. Psychiater, Fotograf und Ethnograf) zeigen die unterschiedlichsten Faltenwürfe und die enorme Ausdrucksvielfalt der Verhüllung. Wie „mit einem eigenen Leben beseelte Stoffe“ [[22] Barten 1995] wirkten die drapierten Frauenkörper. Man versucht die Verhüllungen zu deuten, doch sie bleiben ein Rätsel. „Die phantastischen Stoffwicklungen und Aufblähungen, die Sinnlichkeit des Textils, hinter der eine fantastische Gestalt sich verbringt, übernehmen etwas von der Rätselhaftigkeit des Körpers, die nicht in der Sichtbarkeit und der Sagbarkeit begründet ist“ [[27] Schmidt 1990]

In der Konkreten Kunst, bei der Maßverhältnisse und geometrische Proportionen entscheidend sind, ist die Faltung ein zentrales Gestaltungsmittel und bildet oft die Grundlage für die dreidimensionalen Flächenformen. Die Ausstellung „*Einknicken oder Kante zeigen? Die Kunst der Faltung*“ des Kunstmuseums in Ingolstadt präsentierte im Jahr 2014/2015 zahlreiche Plastiken von Künstlern wie Ben Muthofer und Peter Weber, deren gefaltete Flächenformen von strengen geometrischen Methoden ausgehen und gewisse Ähnlichkeit zum Origami aufweisen [[28] Deiss/Galandi-Pascual/Schimpf 2015]. Charakteristisch für die Werke dieser Künstler ist die prozessuale Verlaufsform der Faltung mit veränderter Regularität und Symmetrie, welche die ästhetischen Entscheidungen und die Einfachheit in der Umsetzung verdeutlichen. Auf eben dieser Einfachheit und Komplexität der Faltung zugleich lag der Fokus der Sonderausstellung „*Falten in Natur und Technik*“ im Phyletischen Museum der Universität Jena im Jahr 2014/2015 [[29] Pohl/Brehm 2015]. Die präsentierten Faltobjekte verdeutlichten, in welchen Formen Faltungen in der Natur vorkommen, welchen Nutzen sie haben, und warum es gleichermaßen hilfreich wie schwierig ist, sie technisch nachzuahmen.

### 2.1.3 Faltung im Bauwesen

Faltungen bieten zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten im Bauwesen. Wegen ihrer technisch-konstruktiven und räumlich-plastischen Wirkung interessieren sie Architekten und Ingenieure gleichermaßen. Bei technisch-konstruktiven Faltungen unterscheidet man zwischen starren und wandelbaren Faltstrukturen. Starre Faltstrukturen folgen dem Strukturformprinzip zur Versteifung eines flächigen Halbzeugs aus dünnwandigem Material (z.B. Wellenblech, Trapezblech, Walzprofil etc.), oder sind als tragende Faltwerkkonstruktionen konzipiert. Wandelbare bzw. kinematische Faltungen folgen dem Konstruktionsprinzip zur Unterstützung dy-

namischer Wandlung von Räumen und Zuständen. Sie bewirken Platzersparnis durch Zusammenfallen von Elementen, Beweglichkeit einzelner Elemente, oder Steuerung von Austauschprozessen. Unabhängig von der Art der Faltstruktur können Faltungen einhergehend mit ihrer technischen Funktionalität stets auch als Gestaltungselement eingesetzt werden. So kann bspw. der Rhythmus der Falten sowie das Wechselspiel von Licht und Schatten entlang der gefalteten Flächen gezielt die räumliche Gestaltung bereichern.

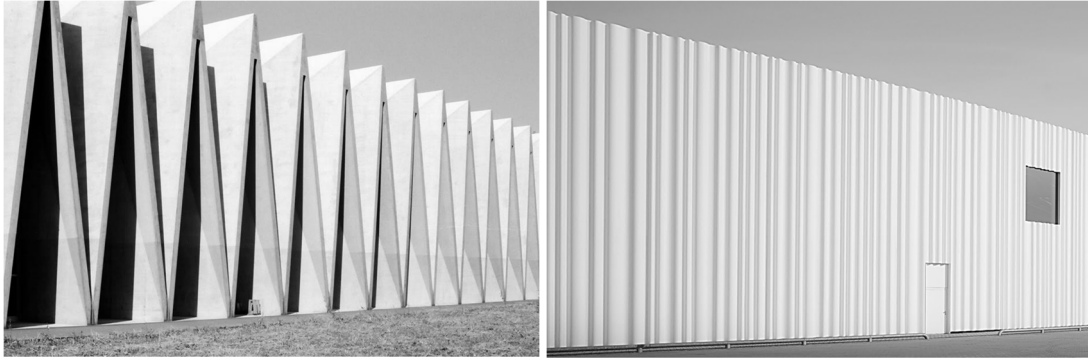
Der phänomenologische Umriss der Faltung im Bauwesen beginnt bei starren Faltstrukturen. Die ersten gefalteten tragenden Konstruktionen waren Faltwerke, die am Anfang des 20. Jahrhunderts als Resultat der damals neuen konstruktiven Möglichkeiten der Stahlbetonbauweise entstanden. Stahlbeton ermöglicht bspw. den Bau von Schalen mit großen Spannweiten. Der kritische Punkt im Hinblick auf die mögliche Spannweite ist das Eigengewicht der Schale, sodass diese sehr dünn sein muss. Um nun zu verhindern, dass die Schale dadurch ihre Tragfähigkeit verliert und zu beulen droht, kann eine Riffelung vorgenommen werden. Diese erhöht die statische Höhe und erlaubt es, die Stärke der Schale zu verringern. Die erste Generation von Faltwerken aus Stahlbeton hat eine einfache Riffelung, welche der Schalenform folgt und aus sich wiederholenden Elementen besteht [[30] Buri/Weinand 2010]. Der *Palazzetto della Sport* von Pier Luigi Nervi (1891-1979, it. Bauingenieur) in Rom ist in der Geschichte des Stahlbetonbaus eines der bedeutendsten Bauwerke in diesem Zusammenhang. Ebenso folgt die Kongresshalle der Unesco in Paris, gebaut 1953 von Nervi, der formellen Logik von Faltwerken. Durch Veränderungen der Faltungshöhe und Faltungsfrequenz optimierte Nervi die entsprechende Momentenbeanspruchung der Tragstruktur. Die Konstruktion ist für Nervi von vorrangiger Bedeutung, gleichzeitig gelte aber: *„Ein technisch perfektes Werk kann auch ästhetisch ausdrucksvoll sein, doch weder in der Gegenwart noch in der Vergangenheit gibt es ein Kunstwerk, das vom ästhetischen Standpunkt her als hervorragend beurteilt worden wäre und in technischer Hinsicht nicht hervorragend ist.“*[[31] Jöedicke 1957].

Im technisch-konstruktiven Bereich waren es des Weiteren Richard Buckminster Fuller, Robert Le Tourneau und Jean Prouvé, die das Potenzial topologisch verformter Muster im Hinblick auf unterschiedliches Tragwerkverhalten erkundeten. Die Kuppel des *Kaiser Hawaiian Geodesic Dome* von Richard Buckminster Fuller (1895-1983 amer. Architekt und Konstrukteur) war das erste Gebäude mit einer selbsttragenden Hülle aus facettiert gefaltetem Blech und Fachwerkstäben. Die Konstruktion ihrer Oberfläche besteht aus neun unterschiedlichen Dreiecksformen und Fachwerkstäben. Die Grundform für die Tessellierung basiert auf einer Kugel­fläche, die in facettierte gleichschenklige Dreiecksformen zerlegt wird [[32] Herkrath/Traut 2011]. Die runden Kuppelbauten von Fuller werden jenseits ihrer tech-

nologischen Rationalität als eine poetische und philosophische Aufwertung interpretiert. Schon für die „*Drop-out-Generation*“ der 60er Jahre galten sie als Alternative zum damaligen Primat der rechtwinkligen Geometrien westlicher Architekturkonventionen [[33] Thiel-Siling 1998]. Weitere wichtige Erkenntnisse zu Faltwerkgeometrien und Faltwerkstrukturen erbrachten die Arbeiten von Robert Le Tourneau (1888-1969, amer. Ingenieur) zur Faltenversteifung mittels sickerversteifter Aluminiumblechtafeln, sowie die Konstruktionen aus gefaltetem Blech von Jean Prouvé (1901-1984, fr. Architekt, Designer). Die Fortsetzung letzterer ist in den diaphanen Faltwerken von Renzo Piano (1937, it. Architekt) zu sehen.

Die Bauten von Santiago Calatrava Valls zeichnen sich durch große, V-förmige und gewellte Faltwerke als funktionale Faltungen aus. Bereits in seiner Dissertation „*Zur Faltbarkeit von Faltwerken*“ aus dem Jahr 1981 untersuchte Calatrava geometrische Prinzipien, deren Anwendung auf Strukturen aus Stäben und Knoten faltbare Grundelemente ergeben [[34] Calatrava 1981]. Anschließend entwarf Calatrava bspw. für einen schwimmenden Pavillon auf dem Vierwaldstättersee eine Faltkonstruktion, die einer Wasserrose gleich aufgeklappt werden kann [35] Blaser 1990].

Nachdem über Jahre hinweg Profilbleche (z.B. Trapezblech, Wellblech oder Wellenternit) in der Architektur eher vermieden wurden und fast nur im Industriebau eingesetzt wurden, scheint sich heutzutage ein großes Interesse an gefalteten Tragwerksformen und den entsprechenden, dafür in Frage kommenden Baumaterialien abzuzeichnen. Ein Beispiel hierfür ist das Sportausbildungszentrum Mülimatt in Burgg (Schweiz), entworfen vom Studio Vacchini (Abb. 2.10) [[36] Kaltenbach 2012]. Die V-förmige Geometrie des Faltwerks prägt die Form und Gestalt des Gebäudes. Völlig stützenfrei überspannt das Faltwerk die 55 m breite Sportanlage und verleiht ihr so eine kraftvolle, skulpturale Wirkung. Deutlich kleinere Faltungen sind bei der Vitra-Produktionshalle in Weil am Rhein von SANAA Architekten zu sehen. Die Fassade ist mit unregelmäßig ondulierenden Acrylglasplatten verkleidet [[37] Kaltenbach 2013]. Hier vermittelt die Faltung die Leichtigkeit und Stofflichkeit der Gebäudehülle, die im Sinne von Sempers Stoffwechseltheorie (Kap. 2.2) eine Art moderner Ornamentierung darstellt (Abb. 2.11).



**Abbildung 2.10** Faltragwerk mit V-förmiger Faltung, Sportausbildungszentrum Mülimatt in Burgg/Schweiz, Studio Vacchini, 2011, aus [36]

**Abbildung 2.11** Gebäudehülle mit unregelmäßig ondulierender Faltung der Vitra Produktionshalle in Weil am Rhein, SANAA Architekten, 2012, aus [37]

Faltungen lassen sich auf unterschiedliche Materialien übertragen und entfalten dort ihre textilen Eigenschaften des Anschmiegsamen und des Weichen. Besonders eindrucksvoll ist die textile Formsprache der Faltung in den Arbeiten von Frank O. Gehry zu erkennen. Der kanadische Architekt und gelernte Schneider bedient sich in seinen Entwürfen oft einer textilen Formensprache, die den Eindruck erweckt, als seien seine Gebäude mit Stoffbahnen drapiert worden. In ihnen zeigen sich die geschmeidig weichen und sinnlichen Faltungen. Als Vertreter des Dekonstruktivismus befasste er sich mit skulpturalen Figuren als gestische Ausdrucksformen und definierte den architektonischen Raum über seine bewegte Oberfläche [[38] Höfler 2009]. An dem Hochhaus in New York „8 Spruce Street“ gestaltet Gehry die Edelstahlhülle wie einen textilen Überzug, der sich über das Gebäude zieht. Die weichen Faltungen werfen sich auf und es entsteht der Eindruck, als ob der Überzug durch den Wind bewegt wird. Die modulierten Oberflächen mit arrangiertem Faltenwurf prägen die bekannten Bauten von Gehry, seien es das Museum in Panama oder das Guggenheim Museum in Bilbao.

Am Beispiel der räumlich gekrümmten Schalenkonstruktion entworfen von Werner Sobek für einen Messestand der Firma Mero ist gut sichtbar, dass sogar gefaltete Kunststoffolie textilen Charakter aufweisen kann. Die Faltstrukturen prägen die spezifische Textur der transluzenten Oberfläche und bleiben durch Erzeugung eines Vakuums formstabil (Abb. 2.12) Die sandgestrahlte Kunststoffolie bringt zusätzlich eine taktile Komponente in die Konstruktion ein, die normalerweise Textilien zugewiesen wird [[39] Stiller 2009].



Abbildung 2.12 Mero-Messestand Nautilus, Werner Sobek Design 2002, aus [39]

Zu den wenigen gebauten Beispielen, bei denen textile Faltstrukturen in der Gebäudehülle zu sehen sind, zählt das Wohnhaus von Hartmut Ayrlé am Bodensee, gebaut im Jahr 2004. Die textile Gebäudehülle ist durch vertikal verlaufende Längsfalten aus Glasfaser-Teflon-Gewebe geprägt, die einachsrig und federnd über zwei Geschosse gespannt sind. Sie fungieren als eine hinterlüftete Wetterhaut vor einer regulär aufgebauten Wandfläche in Holzrahmenbauweise. Die Falten der Membran wirken als innere Dämpfung gegen windangeregtes Flattern der eben gespannten Textilflächen. Bewegungen durch Windsog und Winddruck werden durch die Falten aufgenommen und schaffen erst ab größeren Windstärken nennenswerte Bewegungen der Gesamfläche. Die Haltelinien der Falten sind ebenfalls federnd gelagert, sodass Überdehnungen des Stoffes erst bei extremen Windstärken möglich sind. Die Gebäudehülle zeigt, dass Textilien mithilfe von Faltstrukturen auch für Außenwandkonstruktionen technisch beherrschbare Möglichkeiten bieten und dabei neue und ästhetische Ausdrucksmöglichkeiten schaffen. Die textile Gebäudehülle fungiert quasi als *„Faltenkleid eines Hauses“* [[40] Allgaier 2005].

Neben den bisher im Mittelpunkt stehenden starren Faltstrukturen finden auch wandelbare bzw. kinematische Faltungen Anwendung im Bauwesen. Sofern neben technischer Funktionalität auch der Gestaltungsaspekt von zentraler Bedeutung ist, findet dies meist in Zusammenhang mit wandelbaren Dächern oder beweglichen Fassadenelementen statt. So bildet die Überdachung des Rothenbaum-Stadions in Hamburg von Werner Sobek und Schweger+Partner eine bewegliche Faltstruktur. Die in einem Punkt geraffte textile Membrane lässt sich über radial angeordnete Stahlseile innerhalb von wenigen Minuten öffnen bzw. schließen (Abb. 2.13) [[41] Morgan/Sobek 2004]. Der Prozess des Entfaltens und des Zusammenfaltens der Membrane präsentiert eindrucksvoll den implementierten Faltmechanismus.

Im Bereich der Fassade werden Faltmechanismen bspw. als beweglicher Sonnenschutz, der sich dem Sonnenlauf folgend automatisch öffnet bzw. schließt, eingesetzt. Dabei kann die Faltung unterschiedliche Geometrien annehmen. Die einfachsten Formen sind horizontale oder vertikal angeordnete longitudinale Faltungen, die als zwei- oder mehrflügelige Klappläden ausgebildet werden können

(Abb. 2.14) [[42] Herzog/Krippner/Lang 2004]. Eine deutlich kompliziertere Form des Sonnenschutzes weisen dagegen die beweglichen Mashrabiyas des Al Bahar Towers in Abu Dhabi auf (Abb. 2.15). Es handelt sich dabei um facettierte dreieckige Faltstrukturen, die unterschiedliche Auffaltungszustände einnehmen können. Die faltbare Leichtbaukonstruktion der Mashrabiyas reguliert die thermische Speicherfähigkeit des Gebäudes. Am Tag verhindern die geschlossenen Faltstrukturen ein übermäßiges Aufheizen und bieten Blendschutz. In der Nacht verhindern die geöffneten Faltstrukturen eine Auskühlung des Gebäudes. Im Hinblick auf den Gestaltungsaspekt ist das Erscheinungsbild der faltbaren Außenhaut des Gebäudes in seinem kulturellen Kontext fest verwurzelt [[43] Oborn 2013].



**Abbildung 2.13** Entfaltung der Überdachung des Rothenbaum-Stadions, Werner Sobek und Schweger+Partner, Hamburg, 1997, aus [41]

**Abbildung 2.14** Bewegliche Klappläden, Kifer Techik Showroom, Ernst Giselsbrecht und Partner, Steiermarkt, 2007, aus [42]

**Abbildung 2.15** Bewegliche Mashrabiyas, Al Bahar Towers, Aedas, Abu Dhabi, 2012, aus [43]

Das Curtain-Wall House in Tokyo von Shigeru Ban aus dem Jahr 1995 stellt ein bedeutendes Beispiel in der Architektur für einen textilen, außenliegenden Vorhang dar (Abb. 2.16). Die gesamte Außenwand des Hauses wird durch den freifallenden Faltenwurf des Vorhangs substituiert, der auch ein Sinnbild für die Emanzipation der Gebäudehülle von der Tragstruktur ist. Der textile Vorhang übernimmt die Funktion des Wetterschutzes und löst im geöffneten Zustand die Grenze zwischen Innen und Außen auf. Der private Raum wird öffentlich, der öffentliche Raum wird Teil des Privaten [[10] Sauer 2010].



**Abbildung 2.16** Curtain-Wall House von Shigeru Ban, Tokio 1995, aus [10]

## 2.2 Architekturtheoretische Einordnung der Faltung

Faltstrukturen in der Gebäudehülle stellen eine Art Ornamentensystem dar, das sich nicht nur auf die Anwendung dekorativer Ansätze beschränkt, sondern die Verbindung der geforderten funktionalen und konstruktiven Qualitäten mit ästhetischen Zielen verbindet. Daher beginnt die architekturtheoretische Betrachtung der Faltung bei Gottfried Semper. Die Möglichkeiten und Ausdrucksformen der architektonischen Oberflächengestaltung, welche sich auf textile Eigenschaften und Gestaltungstechniken beziehen, resultieren aus der zentralen Annahme seiner Theorie der Bekleidung. Nach ihr gilt die Textilkunst als die Urkunst der raumabgrenzenden Elemente in der Architektur [[44] de Bruyn/Mauler 2002]. Die erzeugten Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle sind dabei nicht die Art von Ornamenten, die Adolf Loos in seinem Vortrag „*Ornament und Verbrechen*“ kritisierte und als Zeichen der Degeneration bezeichnete [[45] Loss, A. 1988]. Sie thematisieren vielmehr die Emanzipation des Stoffes, die Wertschätzung der Oberfläche und seine materielle Authentizität und Präsenz. Letztendlich geht es um eine Kunst der Gestaltung, bei der die Formvielfalt aus dem Material selbst heraus, und nicht etwa durch oberflächigen Dekor entwickelt wird. Weitere weitreichende Impulse zur Implikation der Faltung lieferte Gilles Deleuze mit dem Buch „*Die Falte. Leibniz und der Barock*“ aus dem Jahr 1988 [[24] Deleuze 2000]. Nicht zuletzt darauf aufbauende Entwurfsstrategien spiegeln sich wieder in den zeitgenössischen Tendenzen zu topologischen Verformungen im Bereich städtischer Strukturen und bei Gebäudehüllen.

### 2.2.1 Die Theorie der Bekleidung und das Ornament bei Semper

Im Jahr 1886 formulierte Friedrich Nietzsche (1844–1900 dt. Philosoph) in seine Vorrede zum Buch „*Die Fröhliche Wissenschaft*“ das Paradoxon „*Oberflächlich - aus Tiefe*“:

*„Oh diese Griechen! Sie verstanden sich darauf, zu leben: dazu thut Noth, tapfer bei der Oberfläche, der Falte, der Haut stehen zu bleiben, den Schein anzubeten, an Formen, an Töne, an Worte, an den ganzen Olymp des Scheins zu glauben! Diese Griechen waren oberflächlich – aus Tiefe!“*[[46] Nietzsche 1926]

Friedrich Nietzsche ließ sich für seine Schrift u.a. von dem deutschen Architekten Gottfried Semper (1803-1879) inspirieren. Semper gilt als der letzte Monumentalbauten-realisierende Architekt, der neben seinen umfangreichen Bauten auch eine umfassende und komplexe Architekturtheorie entwickelte. Bereits in seiner ersten Schrift versucht Semper, ein „*ideales Ordnungsprinzip*“ in der Baukunst zu etablieren, bei dem sich das Dach, die Hülle und der Erdaufwurf schützend um das gemeinschaftsbildende Element des Herdes fügen. In seinem Hauptwerk „*Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten, oder praktische Ästhetik*“ aus dem Jahr 1860

(Bd. 1) bzw. (1863 Bd. 2) veröffentlicht er die Evolutionsgeschichte der Baukunst aus seiner Perspektive, welche die Entwicklung von Baumaterialien und der mit ihnen verbundenen Techniken und Praktiken in den Vordergrund stellt. Besonderes Augenmerk und gleichzeitig seine große Leidenschaft gilt der textilen (Bau-)Kunst. Nach Semper lassen sich sämtliche Techniken auf die Ursprünge der Textur (Sempersches Wort für textile Kunst) zurückführen. Semper sah den Ursprung der Architektur im Textilen, im Weben und Flechten, in der leichten und meist reich verzierten Zeltarchitektur der Nomaden, weil „(...) *textile Kunst und Keramik [diejenigen sind], bei denen sich neben der Zweckverfolgung zuerst das Streben des Verschönerns durch Formenwahl und durch Zierrath kund gab. Unter diesen beiden Künsten gebührt aber wieder der textilen Kunst der unbedingte Vorrang, weil sie sich dadurch gleichsam als Urkunst zu erkennen gibt [...]*“ [[2] Semper 1860].

Dementsprechend baute Semper seine Architekturtheorie auf dem Ornament- und Bekleidungsprinzip auf und stellte somit die bisherige Architekturtheorie in Frage. Diese war davon ausgegangen, dass die Architektur jene Urdisziplin ist, aus der sich alle anderen künstlerischen Disziplinen entwickelten. Es war geradezu ein Affront, dass Semper statt der imponierenden „*männlichen*“ Baukunst die Frauenarbeit des Webens und Flechtens an den Anfang der menschlichen Kunstentwicklung stellte. Denn in der Teppichweberei sah Semper ein Urmotiv der Baukunst. [[47] De Bruyn 2003]. Die vom Gewand ableitbare Wand war für ihn ein nichttragendes, nur raumbildendes bauliches Element, dem noch die Leichtigkeit des Stoffes, des Vorhangs, innewohnte, und das auf den handwerklich ornamentalen Strukturprinzipien von Textilien beruhte [[48] Caspary 2013]. Nach Ingrid Loschek (1950-2010 öst. Modehistorikerin) leitet sich der Ausdruck *Gewand* von althochdeutschen *giwant* („gewendet“) ab, das das gefaltete oder in Falten gelegte, aufbewahrte Tuch bezeichnete [[49] Loschek 2005].

In Anlehnung an das in der Biologie entwickelte Konzept des Stoffwechsels, d.h. die Verwandlung der Form durch den Stoff, beschreibt Semper die materielle Transformation kultureller Formen früherer Stile und Künste. Dabei etabliert er an der zentralen Stelle das Ornament, dessen Form mit der inwohnenden Symbolhaftigkeit in das Material hineingeht. Für Semper war es eine Bedingung, dass Ornamente auf textilen Stoffen, welche die textile Umhüllung der Wand und der Decke bildeten, Flächenverzierungen sein müssen, die eine symbolhafte und stilisierende Wirkung mit einfachen und regelmäßigen Formen erzielen und nicht ornamentale Naturnachahmungen abbilden. „*Die ältesten Ornamente sind solche, die sich oder durch Verflechtungen und Verknotungen bilden [...]*“ [[50] Semper 1851].

Mit der Denkfigur des Bekleidungsprinzips und des Stoffwechsels erreichte Semper eine Emanzipation der Oberfläche, die weit über die damalige nutzungs- und funktionsbezogene Betrachtung der Architektur hinausging. Die Hülle musste

nicht mehr an das Tragwerk gebunden sein und konnte so in ihrem Stoff bzw. ihrem Material frei sein. Semper schrieb: „Jedes Kunstschaffen einerseits, jeder Kunstgenuss andererseits, setzt eine gewisse Faschingslaune voraus, um mich modern auszudrücken – der Karnevalskerzenduft ist die wahre Atmosphäre der Kunst“ [[2] Semper, G., 1860]. Mit dieser Aussage reiht sich Semper in eine Vielzahl von Stimmen ein, die die Suche nach der Wahrheit als Illusion darstellen. Ganz in diesem Sinn transformiert Friz Neumeyer das von Goethe verfasste Diktum „Kunst muss nicht wahr sein, sondern einen Schein des Wahren erzeugen“ zu „Baukunst muss nicht konstruktiv ehrlich sein, sondern einen Schein des ehrlich Konstruierten erzeugen“ [[51] Kähler 1995].

### 2.2.2 Loos' Haltung – die Ornamentlosigkeit

Wie auch für Gottfried Semper war das Textile für Adolf Loos der Vorläufer der Architektur gewesen. Im Gegensatz zu Semper bezeichnete Loos die Decke als das „älteste Architekturdetail“ der Bekleidung, während Semper den Schwerpunkt auf die textile Raumtrennung, d.h. die Wand, legte. Nach Loos stellen Bekleidung und Konstruktion zwei getrennte Elemente dar, die als solche erkennbar bleiben sollen. Dennoch sollen sie eine Einheit bilden. Die Architektur, so Loos, „erweckt stimmungen im menschen. Die aufgabe des architekten ist es daher, diese stimmung zu präzisieren“ [[52] Loos 1910].

In seinem bekanntesten Vortrag „Ornament und Verbrechen“ (1908) kritisiert Loos hingegen die architektonische Dekoration, die auf textile Ursprünge zurückzuführen ist. Seinen unermüdlichen Kampf gegen das Ornament verstand Loos als seinen persönlichen Beitrag zur Kulturgeschichte. Darin propagiert er eine kategorische Trennung von bildender und angewandter Kunst. Der moderne Mensch erschaffe wirkliche Kunst allein im Sinne der bildenden Kunst. Ornamentale Verzierungen oder andere künstlerische Gestaltungsversuche an einem Gebrauchsgegenstand seien eine unangemessene und überflüssige Arbeit. Sie gehörten zu den Anfängen der Kunst, die Loos als „das Lallen der Kunst“ bezeichnet [[53] Gleiter 2002]. Der Gebrauch von Ornamenten stelle einen Rückfall in die barbarischen Zeiten dar. Die Architektur und das Kunsthandwerk gehören nach Loos nicht zu den geistigen Werken der Kunst: „Alles, was einem Zweck dient, ist aus dem Reiche der Kunst auszuschließen!“ [[52] Loos 1910]. Das Kunstwerk soll vielmehr revolutionär sein, das Haus konservativ. An Stelle des Ornaments plädiert Loos für die Wertschätzung und Verwendung edler Materialien, dies sei „Gottes Wunder“ [[54] Loos 1917]. Er spricht sich für Materialwahrheit und -gerechtigkeit aus und gegen die Imitation und Surrogatkunst in der Architektur, denn jedes Material habe eine spezifische Bedeutung in Bezug auf den Menschen und sei durch seine eigene Sprache geprägt. Der Einsatz von Materialien wie Edelhölzer oder Marmorsteine, also von der Natur geschaffener Ornamente, stellt für Loos einen besonderen Wert dar. Vor allem die

Innenräume seiner Villenbauten zeigen seine große Experimentierfreundlichkeit im Umgang mit edlen Materialien.

Architekten der Moderne und ihre Nachfolger entwarfen, ganz wie es Loos prophezeite, schlichte und einfache Bauten mit starker Betonung der Konstruktion und des puren Materials. Die Faszination für neue Technologien mit Bezügen zur Automobil-, Luft- und Schifffahrtindustrie prägte die Bauten des Funktionalismus. Fritz Schumacher (1869-1947, dt. Architekt) beschrieb diese Entwicklung in seinem Buch *„Strömungen in deutscher Baukunst seit 1800“* als die *„Rationalisierung der Fantasie“* [[55] Wollheim 2007].

In den 1950er Jahren herrschten in der Architektur die Gesetze der Ökonomie und die Förderung nach Effizienz und rationaler Gestaltung. Mit Ornamenten und jeglichen Dekoren gestaltete Oberflächen wurden als verschwenderisch, unnützlich und überflüssig bezeichnet. Das Ornament wurde nicht als Teil der Oberfläche betrachtet, sondern lediglich als eine von außen aufgebrachte Applikation. Die industrielle und funktionale Gestaltung wurde dagegen zum Sinnbild für Eleganz, der nichts mehr hinzuzufügen oder wegzunehmen ist. Wie bei Loos wurde die Reduktion auf das Wesentliche propagiert. Pierre Bourdieu (1930-2002, fr. Soziologe) beschreibt in *„Die feinen Unterschiede“* die kulturellen Abgrenzungsmechanismen zwischen den gesellschaftlichen Schichten und geht dabei davon aus, dass „Geschmack“ nichts Individuelles darstellt, sondern von der Gesellschaft geprägt ist. Damit werden neben sozialer Herkunft, Bildung etc. auch Architektur und Design zum Mittel und Ausdruck eines sozialen Status und ggf. zum Ausweis der Zugehörigkeit zu einer Oberschicht [[56] Bourdieu 1982]. So galt die schmucklose weiße Villa, sparsam möbliert mit einem Barcelona-Sessel, als Zeichen des gesellschaftlichen Aufstiegs.

Symbolische und expressive Ausdruckformen der Oberfläche kamen erst (wieder) in den 1960er Jahren mit der Pop-Art Kultur und der Hippiebewegung auf. Farbige und schmückende Muster traten in Fassaden und Innenräumen zum Vorschein und neue Materialien wie Kunststoffe sowie neue Farbkombinationen wurden ausprobiert. Die Postmoderne legte die Basis für eine neue architektonische Kompetenz, die über reine oder demonstrative Funktionserfüllung hinausging und eine emotionale Komponente nicht ausschließt. Die Begeisterung für die Theorie vom *„dekorierten Schuppen“* von Venturi und Brown [[57] Venturi/Brown/Izenour 1977] veränderte den Umgang mit der Fassade stark und generierte neue architektonische Trends. Der Begriff *„dekoriertes Schuppen“* verweist dabei auf die innewohnende Diskrepanz zwischen Funktion und Darstellung. Der funktionale Baukörper des *„dekorierten Schuppens“* ist dabei mit einer ornamentalen Verkleidung versehen und beherbergt auf seiner flachen Außenhaut diverse Kommunikationsmittel. Als modernistische *„Ente“* bezeichnet Venturi ein Gebäude, das seine Form aus der Nutzung herleitet.

Seitdem die Postmoderne der Modernen Architektur ihr „*weißes Kleid*“ wieder auszog, gilt nicht nur „*Fashioning of Architektur*“, sondern die Hülle gewinnt zunehmend an Bedeutung. Trotz der vielen Widersprüche hat Sempers Bekleidungslehre erstaunlicherweise nichts an Begeisterung und Wirksamkeit eingebüßt. So weisen die Bauten von Louis Sullivan häufig textile Oberflächenstrukturen auf. Auch sein Schüler, Frank Lloyd Wright übersetzte die Überlegungen Sempers in ein Bausystem für seine „*textile – block houses*“. Das Bausystem aus Betonelementen zeigt uralte Webmuster in einer zeitgemäßen Konstruktion. Die Betonblöcke wurden vor Ort gegossen und danach mit einer Armierung verflochten, sodass ein System entstand, bei dem Wand, Konstruktion und Ornament eine Einheit bilden. Wright sprach von „*Gebäude weben*“ und bezeichnete sich selbst als „*Weber*“ [[58] Wright 1963].

### 2.2.3 Der Einfluss von Deleuze

In den frühen 1990er Jahren entwickelte sich um den Begriff der Faltung ein reger architekturtheoretischer Diskurs. Die wichtigsten Impulse zur Betrachtung und Explikation der Falte lieferte dabei der französische Philosoph Gilles Deleuze (1925-1995) mit seiner im Jahr 1988 erschienenen Schrift „*Die Falte. Leibniz und der Barock*“. Deleuze verbindet in diesem Buch die mathematischen Arbeiten von Gottfried Wilhelm Leibniz zur Infinitesimalrechnung und Leibniz' Monadentheorie mit den unendlichen Falten barocker Ornamente, sowie den unendlichen Rückgriffen der fraktalen Geometrie von Benoit Mandelbrot.

Bestandteil von Leibniz' Monadentheorie ist, dass Raum und Zeit ihre Absolutheit verlieren und als Ordnungsbeziehungen zwischen Entitäten der materiellen Welt begriffen werden. In diesem Sinn ordnet der Raum die zur gleichen Zeit existierenden Entitäten; die Zeit ordnet ihre kontinuierliche Transformation. Materie wird ihrerseits von Leibniz als sich ständig entwickelnd verstanden. Die Monaden, mit anderen Worten die einfachen, unteilbaren Substanzen, sind in ihrem Kern zwar alle gleich, können sich aber verschieden entfalten. Insofern ist für Leibniz Entwicklung das Entfalten von bereits Existierendem und nicht die Entstehung von prinzipiell Neuem [[59] Lausch 2016].

„*Die Monaden haben keine Fenster, durch die etwas hinein- oder heraustraten kann*“ [Leibniz' 17. Lehrsatz, zitiert nach [60] Finster/Van den Heuvel 2016]. Sie sind autarke Substanzen und verändern sich nur aus sich selbst heraus. Aufgrund ihrer Einfachheit können Monaden nur im Hinblick auf ihre inneren Zustände unterschieden werden. Die inneren Zustände der Monade, welche auf äußere Dinge reagieren, heißen Perzeptionen (Wahrnehmungen). Die inneren Zustände der Monade, welche Selbstbewusstsein oder reflexive Erkenntnis aufweisen, werden als Apperzeptionen bezeichnet [[60] Finster/Van den Heuvel 2016].

De Bruyn beschreibt die Monade als eine „*miniaturisierte Universalbibliothek [...] deren Wände sich in unzählige Regalmeter ‚ausfalten‘, die sich wiederum in einer Unmenge von Büchern mit ungezählten Seiten verzweigen, deren Schrift sich unseren Blicken entzieht.*“ Doch die Monade stelle nicht nur den überwiegend blinden Spiegel eines imaginären Allwissens dar, sondern biete außerdem die Voraussetzung, Anteile dieses Wissens zu aktivieren und anzuwenden [[61] De Bruyn 2008].

Ein wichtiger Punkt in der Monadologie ist die Überwindung des kartesischen Dualismus' von Leib und Seele, wonach beide nicht grundsätzlich verschieden, sondern bloß unterschiedlich entwickelt sind. Damit stellt sich Leibniz nicht nur gegen Descartes, sondern gegen die gesamte aristotelisch-scholastische Tradition. Die Verbindung von Körper und Seele definiert Leibniz indem er darlegt, dass alle Monaden koordiniert wirken, obwohl sie keinen gegenseitigen Einfluss auf ihre innere Struktur ausüben. Diese Wirkung ist gegeben, weil Gott beim Erschaffen von Monaden ihre Einheit und koordinierte Wirkung synchronisiert hat, d.h. die beiden Sphären Körper und Seele in einer prästabilierten Harmonie aufeinander eingestellt hat [Leibniz, zitiert nach [60] Finster/Van den Heuvel 2016].

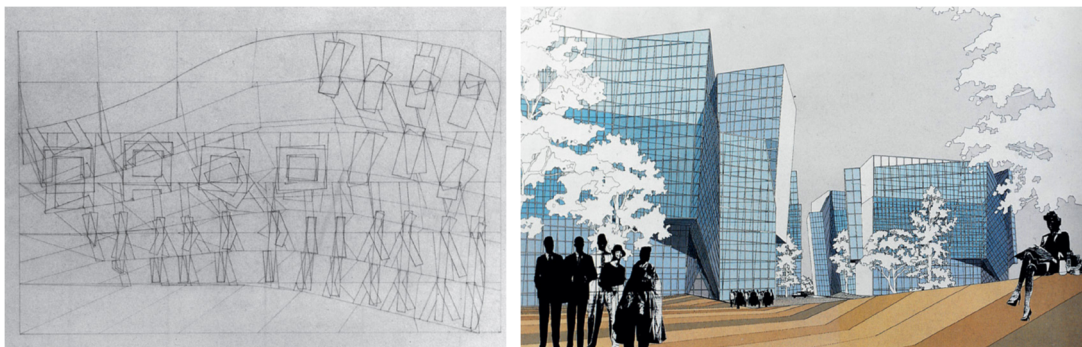
Wie der Geist, so wird auch die Seele als Abbild Gottes bezeichnet. In der Monadologie ist unsere Seele architektonisch, weil sie in der Lage ist, etwas zu produzieren, das den Schöpfungen Gottes ähnlich ist – „*notre Ame est Architectonique*“. Wobei Leibniz hier berücksichtigte, dass im Unterschied zum Verstand die Seele Dinge unbewusst hervorbringen kann. Dies rief in der Modernen Kunst eine große Faszination hervor, insbesondere im Surrealismus. Analog wird in der Architektur die wissenschaftliche Nähe zu Gott insofern besonders deutlich, als dass sie von geometrischen Ordnungsprinzipien wie Gewicht, Maß, Zahl usw. ausgeht, mit deren Hilfe auch die Welt erschaffen wurde [[61] De Bruyn 2008].

Mit der Monadentheorie versucht Leibniz, den Gesamtzusammenhang der Welt zu begreifen. Seinem Grundprinzip „*Nihil fit sine causa sufficiente*“ („Nichts geschieht ohne zureichenden Grund“) ist zu schlussfolgern, dass alles Existierende göttlich begründet ist, auch in seinen Verknüpfungen. Damit ist alles Existierende logisch erfassbar. Wissenschaft und Technik sind nur durch die notwendige Reihung von Ursachen und Wirkungen möglich. In Leibniz' Verständnis soll Wissenschaft das scheinbar Gegensätzliche verbinden und im Streben nach Harmonie die Einheit in der Vielfalt bewirken [[60] Finster/Van den Heuvel 2016].

Leibniz' Verständnis der Entwicklung bzw. (Ent-)Faltung der Welt spiegelt sich in Deleuzes Theorie der Aktualisierung zeitlicher Virtualität wider. Deleuze bezeichnet dabei mit „*Virtualität*“ eine vorgängige Mannigfaltigkeit der Welt, die zwar real existiert, aber nicht durchgängig aktualisiert ist. So besitzt ein Objekt virtuell andere bzw. weitere Erscheinungsformen, die im gegenwärtigen Augenblick noch nicht

wahrnehmbar sind. Sie wären es aber, wenn sie aktualisiert würden. In Deleuzes Schrift stellen Einfaltungen die real existierenden, aber noch nicht aktualisierten Virtualitäten dar, während das Entfalten dem Akt des Aktualisierens gleichkommt. Damit wird das Objekt nicht als eine feste Form betrachtet, sondern als eine „*kontinuierliche Entwicklung der Form*“ [[24] Deleuze 2000]. D.h. Objekte tragen Virtualitäten in sich, die ereignisartig aktualisiert werden können. Sie sind mit anderen Worten gefaltet und zugleich stets bereit zur Entfaltung. Die materielle Welt besteht damit aus Falten, die die kleinste Einheit bilden (und nicht der Punkt). Die Faltungen und Entfaltungen der Materie werden nach Deleuze von der barocken Architektur ausgedrückt [[59] Lausch 2016].

In den frühen 1990er Jahren wurde die Faltung als eine neue Architektur-Strategie für das 21. Jahrhundert deklariert, die laut Jeff Kipnis sowohl formale Lebendigkeit als auch politische Relevanz erreichen sollte. Als frühestes Manifest zu diesem Thema gilt die Ausgabe „*Folding in Architecture*“ der Zeitschrift „*Architectural Design*“ aus dem Jahr 1993 [[62] Lynn 1993]. Darin sind unter anderem die ersten Auseinandersetzungen mit gefalteten Formen und Visionen der New Yorker Architekten Peter Eisenman und Greg Lynn publiziert. Mithilfe der zur damaligen Zeit neuen digitalen Entwurfsmethoden wurde die Faltung als endloser Prozess komplexer Strukturen und Muster in unterschiedlichen Maßstäben aufgefasst. Direkt beziehend auf das Denkmodell der Falte von Deleuze konzipierte Eisenman im Rahmen eines Wettbewerbs einen Masterplan für das Frankfurter Rebstock-Parkgelände. Er setzte zur städtebaulichen Gestaltungsfindung die komplexe Technik der Implikation der Faltung ein, um orthogonale Raster und stereometrische Grundkörper zu verformen. Die Faltung ist dabei die formale Idee des Projekts, die sich an den neuen Möglichkeiten der digitalen Modellierung orientierte. Eisenman konzipierte eine von geknickten Linien durchzogene Gebäudelandschaft, die gegenwärtige und historische Beziehungsmuster der Umgebung einzubeziehen versucht [[38] Höfler 2009]. In der Faltung sah Eisenman die Möglichkeit, allumfassende Totalitäten in der Architektur infrage zu stellen – sowohl die den Raum ordnenden Kategorien Oben und Unten sowie Innen und Außen, als auch die Unterscheidung von Figur und Grund [[62] Eisenman 1991].



**Abbildung 2.17** Masterplan des Rebstock-Parkgeländes, Frankfurt, von Peter Eisenman, aus [59]

Der amerikanische Philosoph John Rajchman unterzieht in seinem Aufsatz „*Faltung*“ [[64] Rajchman 1991] Eisemans Entwurf einer genauen Analyse. Er bemerkt eine Affinität zwischen dem Begriff der Faltung und der Sprache. In diesem Zusammenhang stellt er fest, dass die Flecht- oder plex-Wörter (wie Komplexität oder Perplexität), sowie die Falt- oder pli-Wörter (wie Komplikation oder Implikation) eine wichtige Rolle in architekturtheoretischen Schriften einnehmen. Das Flechtwerk und die Falte, so Rajchman, stünden im Zentrum des philosophischen Denkens im Zeichen der Vielfältigkeit bzw. der Multiplizität. Eine der Vielfältigkeit verpflichtete Architektur ist nicht explizierbar, wird also niemals restlos zu erklären sein: „*Das Vielfältige ist nicht dasjenige, was viele Teile hat, sondern was auf viele Weisen gefaltet ist. [...] Vielfältigkeit beinhaltet daher eine besondere Art von Komplexität. [...] Die Komplexität besteht demnach nicht in dem Einigen, das auf unterschiedliche Weise ausgedrückt wird, sondern vielmehr in der Tatsache, dass alles immer divergiert oder sich über ein Anders faltet [...]*“ [[64] Rajchman 1991].

Eine andere architektonische Strategie verfolgt Greg Lynn mit dem Gedanken einer alternativen Geschmeidigkeit, die durch verfaltete, gelenkige und biegsame Formen erzeugt wird und die Einbindung von Unterschieden in ein kontinuierliches, aber doch heterogenes System darstellt. Lynns Vorschlag bezieht sich vorrangig auf formale Strenge mittels Krümmung, Beugung, Verwindung, Faltung, Flechtung und Einwebung äußerer Kräfte. Dies führt zu dynamischen, differenzierten und topologischen Oberflächen, die in der Lage sind, disparate Elemente miteinander zu verbinden und zu verschmelzen – *in einem Akt multipler Plissierung* [[65] Martin 2015]. Funktionale Aspekte, die kontinuierliche flexible Systeme hinsichtlich der programmatischen Organisation und der Reaktionen auf kontextuelle Parameter aufweisen, trägt Greg Lynn ebenfalls vor und tritt dabei für eine versöhnende Eingliederung von Konflikten, für eine Komplexität ohne Widerspruch ein. „*Statt von den Formen der Faltung als autonom zu reden, ist es wichtiger, eine Logik statt eines Stils der Kurvilinearität zu beachten*“ [[62] Lynn 1993].

#### **2.2.4 Zeitgenössische Tendenzen**

Als Reaktion auf die zunehmenden digitalen Entwurfsmethoden und als Widerspruch gegen jegliche Form von baulicher Globalisierung entwickelte Kenneth Frampton den „*Kritischen Regionalismus*“. Dieser setzt sich mit einer kulturbezogenen Tektonik in der Architektur auseinander, welche am Materialbezug im Semperschen Sinn anknüpft und einen Kontrast zu den digitalen Oberflächen von formal komplexen, zutiefst ortlosen und materiell unbestimmten dreidimensionalen Architekturvisionen bildet. Frampton fordert hier eine *Arrière-Garde* als Gegenteil einer technikgläubigen internationalen Avantgarde-Architektur.

Formen und Konstruktionen seien nötig, die das Taktile und die Materialität in der Architektur stärker berücksichtigen. Das Bauen soll „*viel mehr tektonisch und taktile als szenographisch und visuell*“ wahrgenommen werden [[66] Frampton 1993]. Aus dem wechselseitigen Spiel zwischen dem Topos, dem Typos und der Tektonik soll ein Gebilde entstehen, welches sich auf die Poetik der handwerklichen Konstruktion bezieht. Je nach Klima, Gewohnheit, Kultur und verfügbaren Baustoffen verändert sich das Verhältnis zwischen der Tektonik des eine Raum-Matrix einschließenden leichten Rahmens und der Stereotomie des schweren, erdgebundenen Fundaments. Alle Bauten sollen in ihrer Ausdruckweise konsequent in Bezug zur Umgebung und den vier kosmologischen Elementen Licht, Wasser, Wind und Erosion entworfen werden. In diesem Sinn fordert Frampton eine Architektur, die nicht nur als Szenografie, als ein gebautes Bild fungiert. Das Gebaute soll vielmehr als ein synästhetisches Erlebnis von Wind, Kälte und Wärme, rauen und glatten Oberflächen, Enge und Weite wahrgenommen werden. Es soll etwas Identitätsstiftendes darstellen, das über leicht identifizierbare Symbolbilder hinausgeht.

Dank sich immer weiter entwickelnder Produktionstechnologien bestehen heutzutage Möglichkeiten, die gegensätzlichen Positionen materieller Techniken und kultureller Ausdrucksformen in der Architektur miteinander in Einklang zu bringen. Innovationen bei digitalen Fertigungstechniken und dabei bei Techniken der Artikulation (z.B. Präge-, Schnitt-, Performations- und Formverfahren) sowie Strategien der Gestaltung (z.B. Struktur, Ornamentik, Öffnungen) tragen dazu bei, der Oberfläche eine eigene materielle Präsenz zu verleihen. Oberflächengestaltung ist heute nicht nur von der konstruktiven Notwendigkeit geprägt, sondern auch vom Bestreben, das Ausdruckspotenzial der Architektur zurückzugewinnen – über die Interpretation des Natürlichen bis hin zur Erzeugung von Wahrnehmungseffekten [[67] Pell 2010].

In diesem Sinn hat sich ein Verständnis der Ornamentierung der Oberfläche entwickelt, welches das Ornament einerseits als funktionales und konstruktives Element sieht, andererseits es aber auch gleichzeitig als klassischen Dekor interpretiert. Diese Verbindung von funktionalen und konstruktiven Qualitäten mit ästhetischen und formalen Zielen beschreibt der Theoretiker Kent Bloomer als einen „*kombinatorischen Zustand, in dem außerhalb des Korpus entstandene Dinge mit in ihm entstandenen die Gesamtheit ergeben*“ [[68] Blommer 2006]. Das „*kombinatorische*“ Ornamentieren lässt aus den funktionalen und den ornamentalen Zügen der Oberfläche ein neues gesamthaftes, aber doch duales Ganzes entstehen [[67] Pell 2010]. Im Rückblick auf Louis Sullivans Auffassung lässt das an eine „*dekorierte Struktur, die als harmonisch und wohlüberlegt wahrgenommen wird, nicht ihres Ornamentsystems entkleidet werden kann, ohne dass dabei ihre Einzigartigkeit zerstört wird*“ [[69] Sullivan 1892]. Sullivan weiterhin: „*Struktur und Ornament gewinnen offenbar durch ihre wechselseitigen Bezüge;*

*jedes erhöht den Wert des anderen“*. Gemeinsam bilden sie, was Sullivan als „*organisches Einssein der Idee*“ [[69] Sullivan 1892] bezeichnet.

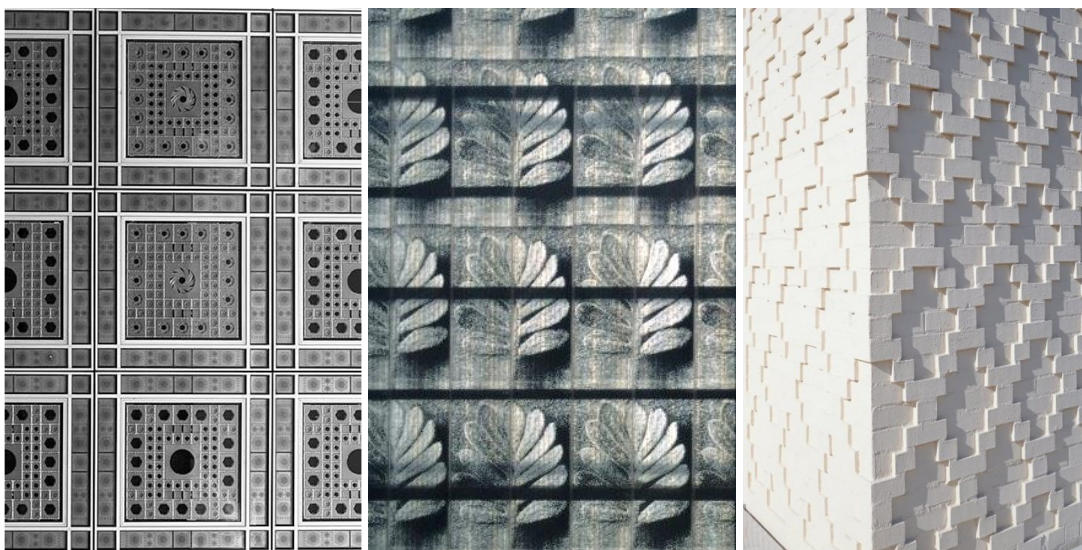
Greg Lynn, der grundsätzlich die „*glatten und charakterlosen Oberflächen*“ ablehnt, beschreibt das komplexe Verhältnis von Ornament und Struktur als „*eine doppelte Deterritorialisierung*“, in der „*jede dieser Kategorien [...] sich zu einem gewissen Maß an innerem Mangel bekennen und der jeweils ändern erlauben muss, sich zu reorganisieren. Es handelt sich nicht um die Anwendung struktureller Ansätze in der Ornamentik oder eine Verwandlung des Ornaments in Struktur, sondern um eine Wechselbeziehung, die beide Kategorien auf unvorhergesehene und neuartige Weise transformiert*“ [[70] Lynn 2004]. Lynn geht in Weiterentwicklung des „*strukturellen Ornaments*“ davon aus, dass Konstruktion und Ornament ineinandergreifende, aufeinander angewiesene Parameter sind.

Aus chronologischer Sicht kann der Auftakt für das Aufkommen von zeitgenössischen Ornament-Fassaden in der Fertigstellung des Instituts du Monde Arabe in Paris von Jean Nouvel im Jahr 1987 gesehen werden (Abb. 2.18). Der Architekt erzeugte mittels Anwendung modernster Technologien ein orientalisch anmutendes Fassadenmuster, das eine Kombination von traditionellen arabischen Architekturprinzipien mit moderner westlicher High-Tech-Architektur darstellt. Die geometrisch-abstrakten Mashrabiya als visuelles Ornament sind ein Hybrid, das den Dialog zwischen den arabischen und den europäischen Kulturen fordert und gleichzeitig die technische Raffinesse der Fassade mit sinnlichen Licht-Schatten-Mustern in Verbindung bringt.

Weitere wesentliche Impulse für die Wieder- bzw. Neuauflage unterschiedlicher Formen der Ornamentik sind insbesondere in den Auffassungen und Arbeiten von Herzog und de Meuron erkennbar. Die Baseler Architekten befassen sich eingehend mit Applikationen von Bildern und figuralen Mustern auf Gebäudefassaden, sowie deren visuellen Zusammenhängen bzw. Abstraktionsprozessen. Dabei geht es ihnen nicht nur um die kommunikativen und repräsentativen Qualitäten der Architektur, sondern vielmehr um ein „*oszillierendes Feld der Wahrnehmung*“ [[68] Herzog 2004]. In diesem Sinn erläutert Jacques Herzog, dass er „*an den direkten körperlichen und emotionalen Eindrücken interessiert ist [...], also den unmittelbaren, intuitiven Eindrücken der Besucher [eines Gebäudes]. Wir [Herzog und de Meuron] wollen Gebäude entwerfen, die Empfindungen erregen und nicht irgendeine Idee darstellen. Die von uns benutzten Bilder sind nicht erzählerisch, sie repräsentieren nichts.*“ [[71] Herzog 2004]. Entsprechend unterlaufen die generierten Bildaufzeichnungen, die von Herzog und de Meuron auf Gebäudefassaden appliziert werden, einen Prozess der Verfremdung durch Wiederholungseffekte, von dem nach Jacques Herzog anzunehmen ist, dass er „*etwas Allgemeines in etwas Neues verwandeln wird*“ [[71] Herzog 2004].

Das eben beschriebene Potenzial der seriellen Wiederholung und der Abstraktion von Bildaufnahmen ist bei vielen Projekten von Herzog und de Meuron von zentraler Bedeutung. So ist bspw. beim Verpackungs- und Verwaltungsgebäude für Ricola Europe der Wiederholungseffekt eines Blattmotivs von Karl Blossfeldt prägend für die Gestalt der Fassade (Abb. 2.19). Auch die Fassade der Fachhochschulbibliothek Eberswalde präsentiert rhythmisierte Übertragungen einiger fotografischer Bildmotive von Thomas Ruff. Mithilfe der dargestellten Bildaufnahmen und deren gewählten Dimensionen wird der Materialität des Gebäudes etwas Neues hinzugefügt – eine komplexe Materialtextur, welche zur Erzeugung neuer Wahrnehmungseffekte beiträgt. Alejandro Zaera-Polo bezeichnet diesen ornamentalen Vorgang bei seiner Auseinandersetzung mit dem Werk von Herzog und de Meuron als „Alchemie“, weil „die Bilder zu einem Teil des Rohstoffs werden, in Einklang mit den baulichen Elementen“ [[72] Zaera-Polo 2005]. Die Bilder transformieren die Wahrnehmung der Gebäudehülle, die durch Kontraste an räumlicher Tiefe gewinnt und zusätzlich durch die Bewegung des Betrachters aktiviert wird.

Transformierte Oberflächen zeichnen ebenfalls einen Großteil der Arbeiten des Münchner Architekturbüros Hild und K Architekten aus. Sie befassen sich mit der Umsetzung der Theorie der Bekleidung von Semper und generieren textilhafte Oberflächen mittels herkömmlicher Konstruktionsverfahren und Materialien. So haben die Architekten bspw. für die Gestaltung der Ziegelfassade für ein Wohnhaus in Aggstaff ein Motiv lokaler Mauerwerksbauten aufgegriffen und neu interpretiert (Abb. 2.20). Die umhüllenden Wände des Wohnhauses erzeugen einen sich wiederholenden, figuralen Oberflächeneffekt, der die Wechselbeziehung zwischen einer tektonischen „Welt der Gebäude“ und der kulturellen Sprache einer „Welt der Gebilde“ darstellt [[73] Hild 2004].



**Abbildung 2.18** Institut du Monde Arabe, Mashrabiya der Südfassade in Paris, Jean Nouvel, 1987

**Abbildung 2.19** Ricola Mulhouse, Fotografie von Karl Blossfeldt, Herzog und de Meuron, 1999

**Abbildung 2.20** Wohnhaus in Aggstaff, Hild und K Architekten, 2000

Die Analogie von Wand und Gewand sowie der in der Textilkunst liegende Ursprung des Ornaments erlauben die architektonische Interpretation des Ornaments im Sinne von Maskieren, Verhüllen und der Kleidung als Mode. Die Gebäudehülle ist bei dieser Interpretation in gewisser Weise die architektonische Bekleidung einer Gebäudestruktur, die in vielerlei Hinsicht mit der Bekleidung des Menschen vergleichbar ist. Beide Arten der Bekleidung werden im Allgemeinen durch zwei Grundkomponenten bestimmt: Zum einen wird Bekleidung als Schutz vor der Natur eingesetzt (Kälte, Hitze, Regen und Wind); zum anderen übernimmt Bekleidung eine ästhetische und stilisierende Funktion. Sie ist ein Mittel, um bestimmte Vorstellungen des Bekleideten selbst an die Mitmenschen auszudrücken.

Der Kulturphilosoph Georg Simmel (1858-1918) bezeichnet Bekleidung und Mode als *„eine Lebensform, durch die man die Tendenz nach sozialer Egalisierung mit der nach individueller Unterschiedenheit und Abwechslung in einem einheitlichen Tun zusammenfasst“* [[74] Simmel 1905]. Die menschliche Bekleidung repräsentiert somit den sozialen Rang und die gesellschaftliche Funktion ihres Trägers. Hingegen repräsentiert die architektonische Bekleidung die Funktion des Gebäudeinneren und die Identität des Gebäudes. Beide Arten der Bekleidung bzw. Umhüllung weisen zudem auf kulturelle und ästhetische Werte hin. Nach Adolf Loos ist, bezogen auf die Bekleidung des Menschen, *„ein kleidungsstück [...] modern, wenn man in demselben im kulturzentrum bei einer bestimmten gelegenheit in der besten gesellschaft möglichst wenig auffällt“* [[75] Loos 1931]. Eine ähnliche Aussage formuliert Ludwig Mies van der Rohe im Hinblick auf die Gebäudehülle als architektonische Bekleidung einer Gebäudestruktur: *„Ich bin in der Tat ein Gegner der Idee, dass ein bestimmtes Gebäude einen individuellen Charakter besitzen sollte“* [[76] Mies van der Rohe 1951].

Die Architektur von Mies van der Rohe zeichnet sich meist durch eine „nackte Ästhetik“ aus – d.h. sowohl durch Reduktion der verwendeten Materialien als auch durch Reduktion des Gebäudes auf seine konstruktiven und raumbildenden Elemente wie Decke, Stütze und Wand. Betrachtet man die von Mies van der Rohe errichteten, wegweisenden *860-880 Lacke Shore Drive Apartaments* am Michigansee genauer, so lässt sich feststellen, dass deren Gebäudehülle gewisse Assoziationen zum textilen Gewebe aufweist. Die Auflösung der tragenden Wand in ein Skelett und einen gläsernen Vorhang, der das Gebäudevolumen umhüllt, lässt eine Art transparenter, entmaterialisierter Umkleidung des Skeletts entstehen, die wie die Sprache der Kleidung schmucklos, zurückgenommen und subtil ist [[77] Blaser 1986]. Für Harather [[78] Harather 1995] gibt die Fassadenstruktur der *860-880 Lacke Shore Drive Apartaments* mit ihrem spezifischen Zusammenwirken von Skelett und Füllung das Bild eines Gewebes mit Leinwandbildung wieder. Das grobtexturierte Fassaden-Gewebe erscheine sorgfältig gestaltet und maßgeschneidert – wie ein zeitlos-schlichtes Kleid.

Roger Ginsburger (1901-1980 fr. Architekt) schreibt in *„Bemerkungen eines Architekten über Mode“*: *„Man darf nicht vergessen, welche suggestive Wirkung von der Kleidung durch ihre Form, Farbe oder Material ausgehen kann, wie sehr die Haltung, die ihm ein Kleid aufzwingt, den Menschen in anregende und aufnahmefähige Stimmung versetzen kann, wie sehr das festliche Aussehen der ihn umgebenden Menschen diese Stimmung noch erhebt“* [[79] Ginsburger 1930]. Ähnlich wie die großen Abendroben von Yves Saint Laurent mit ihren feinen Stoffen, raffinierten Schnitten, besonderen Längenmaßen und immer einer gewissen Enge zum Körper der Trägerin, dieser eine entsprechende Haltung abverlangen, können das in analoger Weise auch architektonische Kleider tun. Ein Beispiel hierfür findet sich beim Testturm der ThyssenKrupp Elevator AG in Rottweil, entworfen von Werner Sobek und Helmut Jahn. Ausgangspunkt des zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit laufenden Bauprojektes ist ein schlanker Betonkern, der von einem Stahlkorsett umfasst und mit Stoffbahnen aus Glasfasergebe umhüllt wird. Die textile Verkleidung verleiht dem Turm ein extravagantes Aussehen und verhilft so zu einem *„großen Auftritt“* im Stadtraum. Die weiße Stoffhülle verweist auf keinerlei werktätige Arbeit – es scheint vielmehr, als hätte der Turm nur die Aufgabe, faszinierend schön zu sein.

Zusammengefasst zeigen zeitgenössische Tendenzen eine Entwicklung hin zu Gebäudehüllen, die eine Einheit von Konstruktion, Material und Ornament bilden. Die Gebäudehülle folgt hier neben funktionalen Aspekten auch immer einem formalen Ausdruck und einer Symbolik. Die umschließende Hülle ist das Erste, was von außen wahrgenommen wird. Form, Oberflächenstruktur, Materialität und Farbe einer Gebäudehülle prägen als gestalterische Merkmale die äußere Erscheinung eines Gebäudes. Damit rückt die Rolle des Ornamentes wieder zunehmend in den Mittelpunkt, was sehr treffend die Ausstellung *„Ornament neu aufgelegt/Re-Sampling Ornament“* des Architekturmuseums Basel aus dem Jahr 2008 widerspiegelt. Sie veranschaulicht die enge Verbindung von Sinnlichkeit und Technik beim Ornament und stärkt die Wertschätzung für das Ornament als Mitteilungsmedium der Architektur. Die Zahl der theoretischen Beiträge, Fachtagungen und Ausstellungen zum Ornament nimmt im Bereich der Architektur kontinuierlich zu. Es gilt, dem gestiegenen Bedürfnis nach belebenden und individuellen Komponenten in der Oberfläche Rechnung zu tragen. Bei textilen Gebäudehüllen kann die Erzeugung von Faltstrukturen einen wesentlichen Beitrag zu neuen ornamentalen Flächenkompositionen leisten.

### 3 Systematisierung von Faltstrukturen aus architektonischer Sicht

Zwar ist ein umfangreicher Literaturbestand zur Faltkunst *Origami* mit großer Auswahl an Faltanleitungen zu figürlichen und abstrakten Faltobjekten vorhanden. Jedoch ist der Autorin keine wissenschaftlich fundierte Abhandlung bekannt, die Faltstrukturen aus architektonischer Sicht systematisch beschreibt und einordnet. Erst eine solche Systematisierung von Faltstrukturen kann die notwendige Gestaltungshilfe für die Textile Architektur schaffen, mit deren Hilfe das unerschöpfliche Spektrum an neuen Erscheinungsformen für textile Gebäudehüllen entdeckt werden kann. Ebenso ist ein tiefes Verständnis der möglichen Faltstrukturen notwendig, um über Fragen der Ästhetik hinaus auch funktionale Faltungsprozesse sowie materialgerechte Anwendungen bei textilen Gebäudehüllen realisieren zu können.

Die Beschreibung und Systematisierung von Faltstrukturen erfolgt in den verschiedenen Disziplinen der Natur- und Ingenieurwissenschaften nicht einheitlich. Entsprechend dem Interessenfokus der jeweiligen wissenschaftlichen Disziplin werden unterschiedliche Merkmale und Kriterien zur Systematisierung herangezogen. Im vorliegenden Kapitel wird die Thematik aus Sicht der Architektur adressiert, wobei auf Erkenntnisse aus anderen Disziplinen zurückgegriffen wird. Die Systematisierung erfolgt in Form eines Morphologischen Kastens. Mit dieser Darstellungsform können die bestimmenden Merkmale von Faltstrukturen und ihre Ausprägungen leicht ersichtlich werden.

#### 3.1 Systematisierung von Faltstrukturen im Morphologischen Kasten

Die hier gewählte Darstellungsmethode geht auf den Astrophysiker Fritz Zwicky (1898–1974) zurück, der sich mit verschiedenen Aufbaustrukturen und ihren Gesetzmäßigkeiten befasste. Der Morphologische Kasten ist eine analytische Kreativitätstechnik, bei der systematisch an die Ideenfindung herangegangen und mit Hilfe einer Matrix gearbeitet wird. In [[80] Schlicksupp 1988] wird „*Morphologie*“ als die „*Lehre von den Formen, Gestalten und Strukturen*“ und deren zugrundeliegenden Aufbau- und Ordnungsprinzipien bezeichnet. Man spricht daher auch von der „*Lehre des geordneten Denkens*“. Das Ziel ist es, ein „Problem“ (hier: Faltstruktur) in Teilaspekte zu zerlegen (hier: Merkmale von Faltstrukturen aus architektonischer Sicht) und die Ausprägungen der Teilaspekte (hier: Merkmalsausprägungen) systematisch miteinander zu kombinieren, um so möglichst viele Kombinationen im Sinne von potentiellen Lösungen (hier: Erscheinungsformen von Faltstrukturen für textile Gebäudehüllen) zu entwickeln. Anschließend kann eine Analyse der zielfüh-

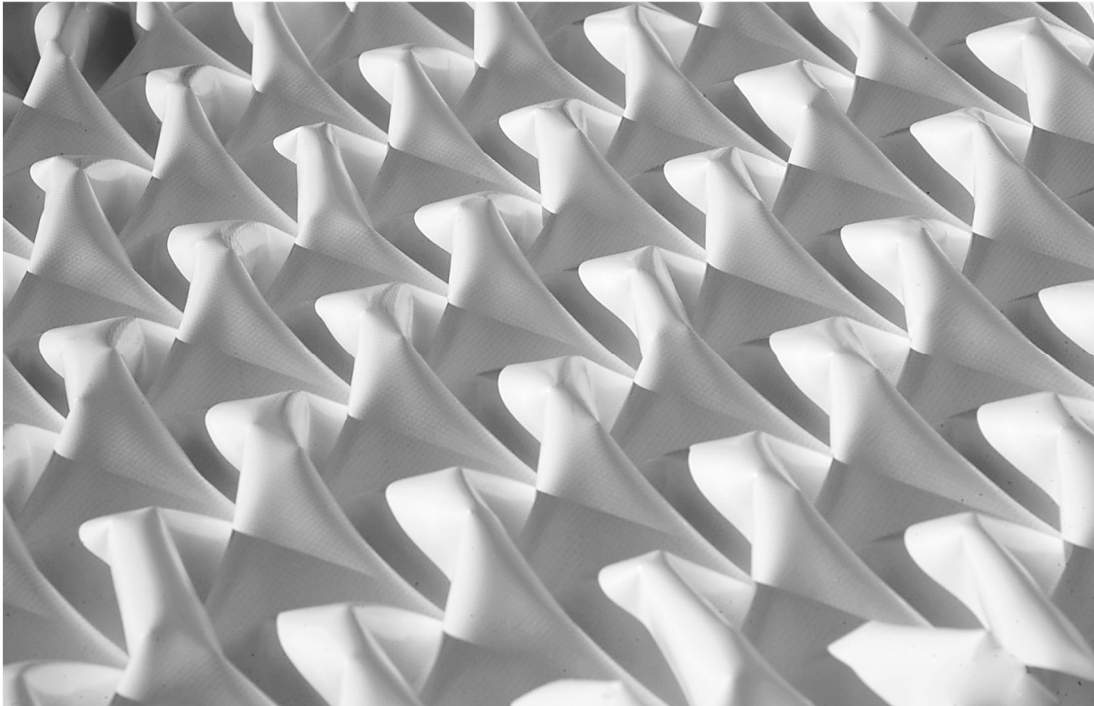
renden Lösungen erfolgen, die sich durch die Kombination bestimmter Merkmalsausprägungen ergeben.

Der hier erarbeitete Morphologische Kasten ist in Abb. 3.1 dargestellt und basiert auf einer umfangreichen Analyse unterschiedlicher Faltstrukturen aus Literatur zu technischen Anwendungen faltbarer und gefalteter Strukturen [[81] Trautz/Ayoubi 2011], [[82] Künstler/Trautz 2011] und [[83] Barej 2013]. Durch die gezielte Adaption der relevanten Merkmale und die eindeutige Definition ihrer (allgemeingültigen) Ausprägungen wird eine Systematisierung von Faltstrukturen in der Architektur erarbeitet. Die charakteristischen Merkmale von Faltstrukturen werden dabei in Zeilen untereinander aufgelistet, während die möglichen Ausprägungen in den zugehörigen Spalten eingetragen sind. Die Merkmale werden in vier Gruppen zusammengefasst. Die Charakterisierung einer konkreten Faltstruktur erfolgt, indem die Markierung je eines Eintrages in jeder Zeile erfolgt. Durch die Verbindung der markierten Einträge entsteht ein Pfad, der die Eigenschaften der betrachteten Faltstruktur sowie ihre mögliche Anwendung definiert.

MERKMALE	AUSPRÄGUNGEN						
Anwendung	Steifigkeitserhöhung	Größenreduzierung	Beweglichkeit	Gestaltungselement	Multifunktionsintegration +		
Konstruktive Durchbildung	beweglich [wandelbar]			unbeweglich [starr] +			
Strukturform	Längsfaltung parallel	Längsfaltung nicht-parallel	Facettenfaltung v-förmig +	Facettenfaltung rautenförmig	Facettenfaltung diagonal	Facettenfaltung geknittert	Facettenfaltung andere
Faltungszustand	offen [stumpfwinklig]		offen [spitzwinklig] +	geschlossen [weit]		geschlossen [eng]	
Größenordnung	mikro		meso +		makro		
Faltensymmetrie	symmetrisch +			asymmetrisch			
Neigungswinkel	aufrecht +	geneigt [steil]	geneigt [mittelsteil]	geneigt [flach]	liegend		
Faltkantenform	scharfkantig [diskret]			weichkantig [ondulierend] +			
Faltenanordnung	regelmäßig +	unregelmäßig		gleichmäßig			
Materialsteifigkeit	steif			biegeweich +			
Materialverbrauch	einfach	zweifach +	dreifach	mehrfach			
Falttechnik	plastische Umformung +	elastische Umformung		Zusammenfügung			
Stabilisierungsmethoden	thermische Fixierung	Infusion von Harzen		andere Ansätze/Kombinationen +			

Abbildung 3.1 Systematisierung von Faltstrukturen im Morphologischen Kasten

Das in der Matrix eingetragene Beispiel eines Pfades entspricht der Charakterisierung der textilen Faltstruktur aus Abb. 3.2. Bei dieser V-förmigen Facettenstruktur aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe handelt es sich um Faltstruktur 1 aus Kapitel 4 (alle Faltstrukturen aus den Gestaltungsstudien werden in Kap. 4 im hier entwickelten Morphologischen Kasten eingeordnet).



**Abbildung 3.2** V-förmige Facettenfaltung

Der Morphologische Kasten hilft dabei, unterschiedliche Charakteristika von möglichen Faltstrukturen zu erkennen. Er stellt damit eine Art Entwurfshilfe dar, mit der die Anwendungsmöglichkeiten von Faltstrukturen in der Architektur erkannt und definiert werden können, sodass beim Entwerfen bzw. Gestalten zielorientiert vorgegangen werden kann. Bei der Suche nach einer zielführenden Faltstruktur für ein bestimmtes technisches oder gestalterisches Problem können möglicherweise mehrere unterschiedliche Lösungen in Frage kommen. D.h., es können verschiedene Pfade zum Ziel führen. So entstehen Alternativlösungen, welche die Potenziale von Faltstrukturen aufzeigen. Die hier vorgestellte Systematisierung von Faltstrukturen im Morphologischen Kasten ist notwendig, um Faltstrukturen aus architektonischer Sicht für gestalterische und technische Zwecke zugänglich zu machen.

### **3.2 Anwendung und konstruktive Durchbildung**

Anwendung als systematisierendes Merkmal bezieht sich auf den Einsatzzweck einer Faltstruktur in der Architektur. Als Ausprägungen dieses Merkmals werden Steifigkeitserhöhung, Größenreduzierung, Wandelbarkeit, Gestaltungselement und Multifunktionsintegration definiert.

Steifigkeitserhöhung mittels Faltungen wird meist bei Leichtbauanwendungen von dünnwandigen Materialien vorgenommen, um Material zu sparen und damit die Systemeffizienz zu steigern. Durch die Tiefe und Neigung der Falten kann die Tragfähigkeit des Faltwerks beeinflusst werden.

Größenreduzierung und damit gegebenenfalls einhergehend Volumenreduzierung erfolgt durch das Zusammenfallen einer Oberfläche oder eines dreidimensionalen Körpers. Hierdurch sinkt dessen Platzbedarf, was beispielsweise für Transport- oder Lagerungszwecke von großem Interesse ist.

Die Beweglichkeit von Faltungen ermöglicht es, die Gestalt eines Systems zu variieren. Durch die möglichen Formänderungen kann eine Faltung eine bestimmte technische Funktionen erfüllen, wie z.B. Energie absorbieren oder als Verschattungselement dienen.

Die Faltstruktur als Gestaltungselement kann die räumlich-plastische Wirkung von Oberflächen verbessern. So kann bspw. der Rhythmus der Falten in Verbindung mit dem Wechselspiel von Licht und Schatten entlang der gefalteten Flächen gezielt die räumliche Gestaltung bereichern. Dabei kann die Faltstruktur als rein dekoratives Element ausgebildet werden oder auch zusätzlich die technisch-funktionalen Leistungseigenschaften einer Hülle unterstützen (s. Multifunktionsintegration im Folgenden).

Multifunktionsintegration erfolgt, wenn eine Faltung verschiedene technische und/oder nicht-technische Funktionen erfüllen kann. Bspw. könnte eine Faltstruktur die Steifigkeit einer dünnen Fläche erhöhen, die dadurch raumüberdeckend (gestalterische Funktion) sowie tragend (technische Funktion) wirken kann. Im Bereich des Leichtbaus stellen Faltstrukturen ein effizientes Konstruktions- und Strukturformprinzip dar. Die dreidimensionalen Strukturen können zur besseren Integration weiterer Funktionsmaterialien beitragen, ohne deren Funktion zu schmälern. Die Faltung als Gestaltungselement und als Mittel zur Integration mehrerer Funktionen wird in Kap. 5 und 6 untersucht.

Konstruktive Durchbildung bezieht sich auf die Beweglichkeit der Faltstruktur, welche sich über die Ausgestaltung der Faltkanten ergibt (unbeweglich bzw. starr oder beweglich bzw. wandelbar). Grundsätzlich unterscheidet man in Bauwesen zwischen strukturellen und wandelbaren Faltungen.

Strukturelle Faltungen sind unbewegliche Faltungen, welche außer der Kontinuität des Querschnitts keine besonderen konstruktiven Maßnahmen erfordern, da keine Änderung der Geometrie vorgesehen ist. Sie folgen dem Strukturformprinzip der Versteifung eines flächigen Halbzeugs aus dünnwandigem Material (z.B. Wellenbleche, Trapezbleche, Walzprofile, etc.) und sind oftmals als tragende Faltwerkkonstruktionen konzipiert. Faltwerkkonstruktionen setzen das Leichtbauprinzip um,

indem sie die Tragstruktur und die Gebäudehülle integrieren und gleichzeitig ein geeignetes Strukturformprinzip für materialsparende und effiziente Konstruktionen darstellen. Solche Leichtbaukonstruktionen können als Longitudinal- oder Facettenfaltungen ausgebildet werden (siehe zu Strukturform) und aus verschiedenen Materialien wie Stahlbleche, Kunststoffplatten, Verbundwerkstoffe oder Sandwichelemente hergestellt werden. Voraussetzung einer geeigneten Materialwahl ist ein zum jeweiligen Material passender Größenmaßstab des Faltmusters bzw. der Faltkonfiguration [[84] Herkrath/Traut 2011].

Wandelbare Faltungen folgen dem Konstruktionsprinzip der Unterstützung dynamischer Wandlung von Räumen und Zuständen. Sie können aufgrund ihrer Materialeigenschaften oder durch den Einsatz von Gelenken gebildet werden. Wandelbare Faltungen können ihre Faltflächen zueinander verfallen, wobei bewegliche Faltstrukturen aus gelenkig verbundenen Flächenelementen nur Bewegungen innerhalb bestimmter Grenzen ausführen können. Faltmechanismen, die sich aus kinematisch-geometrischen Abhängigkeiten der einzelnen Faltkanten zueinander ergeben, werden in [[82] Künstler/Trautz 2011] untersucht. Durch die Möglichkeit des Zusammenfaltens von Elementen bzw. der Beweglichkeit einzelner Elemente können wandelbare Faltungen bspw. Platzersparnis ermöglichen, die wiederum Voraussetzung für die die Sicherstellung und Steuerung von Austauschprozessen ist. So werden wandelbare, technisch-funktionale Faltungen zur Unterstützung von Austauschprozessen eingesetzt, wenn das Austauschorgan große Flächen benötigt. Solche Systeme werden u.a. als Wärmerückgewinnung in Klima- und Lüftungsanlagen eingesetzt. Deren Plattenwärmetauscher bestehen aus profilierten Metallplatten, zwischen welchen die beiden Medien zirkulieren. Die Faltstrukturen der Platten erhöhen dabei die Steifigkeit der Bleche und vergrößern gleichzeitig die wirksame Fläche, sodass bereits bei niedriger Strömungsgeschwindigkeit hohe Turbulenzen erzeugt werden (Effizienzerhöhung) [[8] Archplus 131 1996].

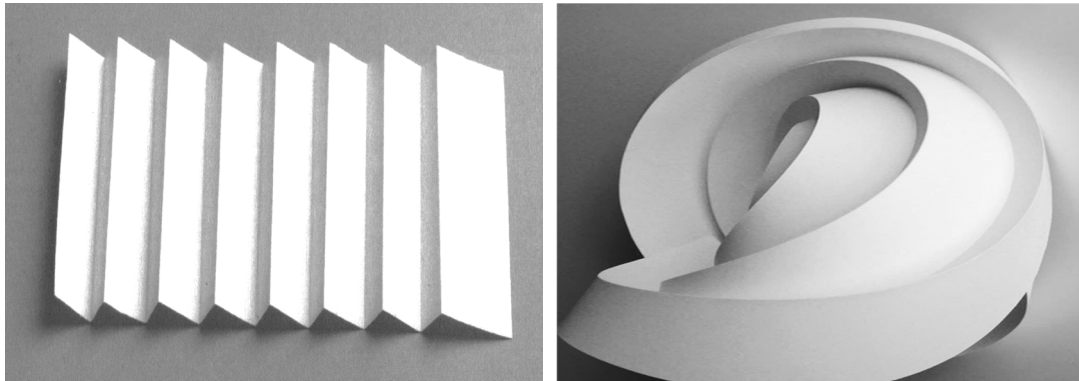
### **3.3 Geometrische Durchbildung**

#### **3.3.1 Geometrische Anordnung der Faltkanten und Schnittpunkte**

Die Strukturform charakterisiert die geometrische Grundkonstellation der Faltkanten und ihrer Schnittpunkte zueinander. Prinzipiell wird zwischen longitudinalen und facettierten Faltstrukturen differenziert [[82] Künstler/Trautz 2011], [[81] Trautz/Ayoubi 2011], die sich jeweils in Abhängigkeit von der weiteren Faltkantenausbildung in weitere Ausprägungen unterteilen lassen.

Longitudinalfaltungen definieren Faltungen, dessen Faltkanten sich nicht schneiden. In Bezug auf die Anordnung ihrer Faltkanten kann dabei zwischen parallel und nicht-parallel bzw. windschief zueinander verlaufenden Longitudinalfaltungen unterschieden werden. Beide Faltungen können wiederum gekrümmt, ver-

dreht oder wellenförmig ausgestaltet sein. Abb. 3.3 und 3.4 stellen beispielhaft parallele und nicht-parallele Longitudinalfaltungen dar.



**Abbildung 3.3** Parallele Longitudinalfaltungen, Papierskulptur, Paul Jackson, aus [85]

**Abbildung 3.4** Nicht-parallele Longitudinalfaltungen, Papierskulptur, Matt Shlian, aus [85]

Parallele Longitudinalfaltungen sind die einfachsten und am häufigsten vorkommenden, aneinandergereihten Faltstrukturen. In der Sprache des Origami verlaufen ihre Berg- und Talfaltkanten parallel zueinander. Die Faltungen weisen meistens ein regelmäßiges Faltenprofil auf, das dem Faltschema Tal-Berg-Tal folgt – auch bekannt als Ziehharmonikafaltung bzw. Akkordeonfaltung. Eine Gruppe von vier Brüchen Tal-Berg-Berg-Tal wird als Kastenfaltung bezeichnet. Abhängig von der Position der Faltflächen zueinander bilden sich bei parallelen Longitudinalfaltungen aufrechte, geneigte oder liegende Faltungen aus [[85] Jackson 2015]. Dank ihrer Regelmäßigkeit können parallele Longitudinalfaltungen besonders einfach und aus nahezu jedem Material angefertigt werden. Durch Änderungen der Faltungshöhe und/oder der Verlaufsrichtung können relativ einfach wechselnde rhythmische Variationen herbeigeführt werden. Mit gezielten Einschnitten können weitere Effekte und komplexere Strukturen erzeugt werden.

Nicht-parallele Longitudinalfaltungen liegen vor, wenn die Faltkanten der Berg- oder Talfalten schräg zueinander verlaufen. Dabei können beispielweise Bergfalten parallel zueinander verlaufen, während Talfalten schräg zu den Bergfalten und gleichzeitig parallel zueinander angeordnet sind. Werden dazu die schrägen Talfalten an der senkrechten Achse um  $90^\circ$  gespiegelt, sodass das Faltenprofil eine ununterbrochene Zickzacklinie bildet, entstehen interessante Lichteffekte. Nicht-parallele Longitudinalfaltungen können zudem auch gekrümmt ausgeformt sein und beliebig gestaucht oder gedehnt werden [[85] Jackson 2015].

Facettenfaltungen zeichnen sich durch relativ kurze Faltkanten aus, die sich in einem Punkt mehrmals schneiden. Dabei entstehen u.a. tetraeder- oder pyramidenförmige, wie auch mehrseitig polygonale Auffaltungen auf drei-, vier-, sechs- oder mehrseitigen Grundrissen. In Bezug auf ihre geometrische Konstellation bilden Facettenfaltungen meist dreieckige, rechteckige oder rautenförmige Flächenelemente, welche die Grundelemente eines regelmäßig geformten Körpers darstellen. Die

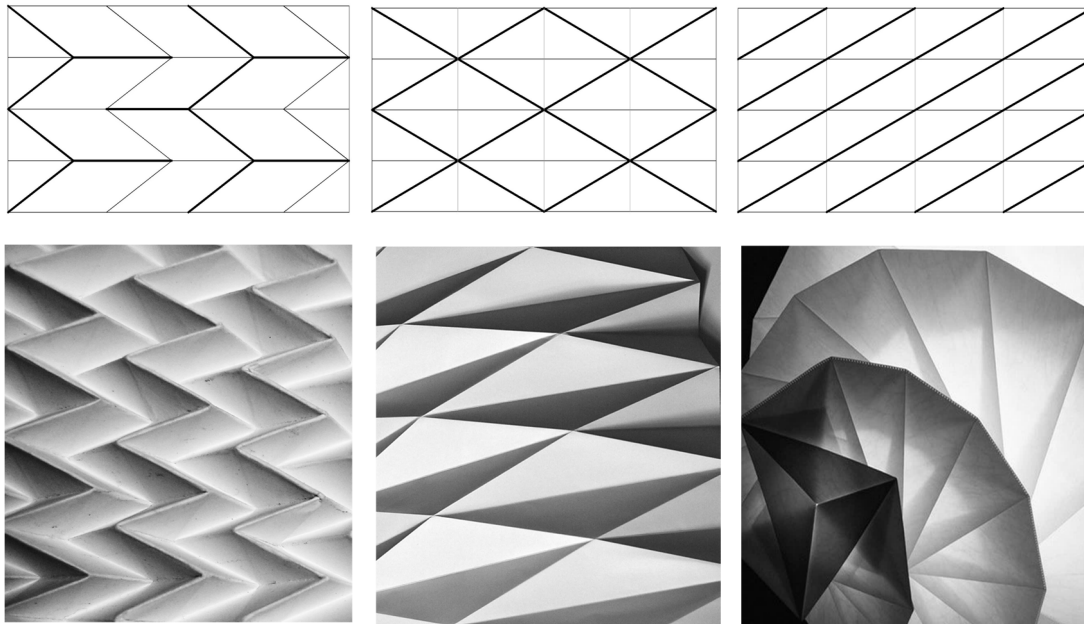
Faltengeometrie gründet auf einem reliefartigen Faltschema, welches primär von einer linearen Aufteilung oder einem Raster ausgeht, auf dem geometrische Grundelemente der Faltstruktur sekundär angeordnet werden. So betrachtet zählen auch Origami-Kunstobjekte zur Gruppe der Facettenfaltungen. Besonders Tessellations-Origami mit ihren rein geometrischen Mustern stellen eine nahezu unerschöpfliche Inspirationsquelle für aneinandergereihte facettierte Faltstrukturen dar.

In der vorliegenden Arbeit liefert die Origamikunst wichtige Impulse für die Gestaltung und Generierung von Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle. Neben den zahlreichen Formen, die mithilfe von Beugung und Verwindung des Papiers erzeugt werden, gibt es in der Origamikunst auch Faltungen, welche sich in abgewandelter Form auf Textilien übertragen lassen und dabei äußerst interessante Oberflächenstrukturen erzeugen. Beispielsweise entstehen im Textil facettierte Faltungen, indem das Material zu einem Punkt gerafft wird. Zwar lassen sich aufgrund der biegeweichen Materialeigenschaften nicht immer klare Faltungslinien definieren. Dennoch werden in der vorliegenden Arbeit geraffte textile Faltstrukturen entsprechend ihrer geometrischen Grundform als Facettenfaltungen klassifiziert (siehe Kap 4.2).

Zu den am häufigsten vorkommenden Facettenfaltungen zählen

- V-förmige Facettenfaltungen (Abb. 3. 5),
- Rautenförmige Facettenfaltungen (Abb. 3.6),
- Diagonale (spiralförmige) Facettenfaltungen (Abb. 3.7), sowie
- Geknitterte Facettenfaltungen (Abb. 3.8 auf S. 18).

Die genannten Faltungen bilden neben der Gruppe der anderen bzw. weiteren, weniger gängigen Facettenfaltungen die Ausprägungen des Merkmals Strukturform. Im Folgenden wird auf die einzelnen Arten der Facettenfaltung näher eingegangen.



**Abbildung 3.5** V-förmige Facettenfaltung

**Abbildung 3.6** Rautenförmige Facettenfaltung

**Abbildung 3.7** Diagonale (spiralförmige) Facettenfaltung, aus [85]

V-förmige Facettenfaltungen bilden aus den Bergfalten eine V-förmige Faltkonstellation und werden in der Literatur auch als Fischgrätenfaltungen bezeichnet. Die Faltungen basieren auf einem Faltschema, das meist von einer linearen Aufteilung der Fläche oder von einem orthogonalen Raster ausgeht, worauf V-förmige Faltungsrapporten liegen. Das Faltmuster entsteht durch das Zusammentreffen in einem Schnittpunkt von drei Bergfalten und einer Talfalte, oder einer Bergfalte und drei Talfalten. V-förmige Facettenfaltungen können sich in linearer Progression unendlich fortsetzen. Der Winkel der V-Falten zur Symmetrieachse beträgt bei den meisten Faltungen  $45^\circ$ , kann jedoch prinzipiell jede Größenordnung zwischen wenigen Grad über  $0$  und wenigen Grad unter  $90$  annehmen [[86] Jackson 2011]. In der Aufsicht bildet das Faltmuster eine fischgrätenartige Struktur aus zwei Reihen gespiegelter Trapeze. Seitlich in Längst- als auch in Querrichtung entsteht eine Faltung mit einem nahezu zickzackförmigen Faltprofil. Dieses zieht sich beim Schließen der Falten zusammen und ergibt so ein sehr kompaktes Muster aus vielen kurzen Berg- und Talfalten. Auf der anderen Seite überführt das Öffnen der Falten diesen sehr kompakten Zustand in eine große Fläche. Dieses sogenannte Fischgrätenmuster (Miura-Ori) wurde erstmals von dem japanischen Forscher Miura wissenschaftlich untersucht und beschrieben. Technische Errungenschaften, die auf diesem Prinzip beruhen, sind bspw. ausklappbare Sonnensegel für Satelliten. In der Natur entfalten sich bspw. die Blätter der Buche nach demselben Prinzip aus der kompakten Knospe zu einer Fläche [[87] Buri 2006].

Bei Rautenförmigen Facettenfaltungen generieren die Bergfalten ein Rautenmuster. Die Faltungen gründen auf einem orthogonalen oder linearen Raster mit einem X-

förmigen Faltschema. Sie entstehen, wenn sich vier Bergfalten und zwei Talfalten in einem Knotenpunkt treffen. Das Grundelement dieses Faltmusters ist eine in der Diagonalen gefaltete Raute. In einem regelmäßigen Rautenmuster bilden die Diagonalen parallele Linien. Werden die Diagonalen als Talfalten und die Seiten der Rauten als Bergfalten ausgebildet, erhält die Oberfläche eine regelmäßige zylindrische Krümmung. Die Biegung der Faltung hängt von der Geometrie der Rauten ab: Je spitzer die Rauten, desto schwächer krümmen sich die gefalteten Oberflächen (und umgekehrt). Gleichförmige Rauten erzeugen eine Annäherung an ein Kreissegment. Sind die Rauten zu unterschiedlich großen Drachenvierecken verzogen, so variiert der Kurvenradius und ermöglicht die Annäherung an eine beliebige stetige Kurve [[88] Buri 2010]. Die einzelnen rautenförmigen Faltstrukturen bilden stets dreieckige Flächen. Dies ist ein großer Vorteil in Bezug auf das Tragverhalten der Konstruktion, da das Dreieck die stabilste Form aller Polygone ist. Damit sind Rautenförmige Faltungen nicht nur aufgrund ihrer großen Formenwelt und Flexibilität für die Anwendung in der Architektur interessant, sondern auch aus Sicht der Statik [[89] Stewart 1999].

Diagonale Facettenfaltungen basieren ebenso wie die anderen Facettenfaltungen auf einem orthogonalen oder linearen Raster. Das Grundelement dieses Faltmusters ist ein in der Diagonalen gefaltetes Rechteck, Parallelogramm oder Trapez. Dabei werden die Außenkanten aus einer parallelen Position heraus gleichmäßig in Bergfalten unterteilt und diagonal nach oben gedreht. Schräg dazwischen liegen zueinander parallel verlaufende Talfalten, die die Bergfalten diagonal miteinander verbinden. Mehrere derart gefaltete Grundelemente aneinandergelängt verwinden sich spiralförmig [[90] Zeier 1993]. In Abb. 3.6 ist eine Faltleuchte von Issey Miyake dargestellt, die den beschriebenen geometrischen Prinzipien der Diagonalen Facettenfaltung folgt. Die Faltung generiert die Form und stabilisiert das Objekt zugleich. Das Faltojekt lässt sich zudem bei Bedarf flach zusammenlegen.

Geknitterte Facettenfaltungen zählen zur Gruppe der Facettenfaltung, obwohl sie keinen geometrischen Formen folgen, sondern durch Zusammenknüllen und Drücken eines dünnen Materials entstehen. Die Faltekanten können sich dabei schneiden oder unkontrolliert unterbrechen. Die geknüllte Oberfläche lässt sich gleichmäßig in jede Richtung auseinanderziehen. Ausnahme bilden bewusst herbeigeführte lineare Knitterfalten. Hier wird das Material nur in eine Richtung geknittert und kann entsprechend auch nur in die entgegengesetzte Richtung wieder gestreckt werden. Radiale Knitterfalten verlaufen vom Mittelpunkt der Oberfläche aus gleichmäßig über die begrenzten Flächen. Dabei entstehen zahlreiche parallele Knitterfalten mit taktilen Oberflächen und äußerst frappierender Wirkung. Mit Geknitterten Facettenfaltungen lassen sich interessante Lichteffekte erzeugen, was diese Faltungsart auch für Künstler und Designer besonders interessant macht.

Bspw. verwendet der französische Faltkünstler Vincent Floderer [[91] Schröder 2008] die Knittertechnik (engl. Crumpling) für seine Kunstwerke aus Papier, die eine gewisse Ähnlichkeit zu ihren Vorbildern aus der Natur aufweisen (Abb. 3.8).



**Abbildung 3.8** Knitterfalten „*Microcosme*“ von Vincent Floderer, aus [91]

Prinzipiell können Facettenfaltungen unendlich viele unterschiedliche geometrische Formen annehmen, wobei sich theoretisch auch unendlich viele Faltkanten in einem Knotenpunkt schneiden können. Aufgrund der komplizierten konstruktiven Durchbildung finden Facettenfaltungen mit acht und mehr Faltkantenverschnidungen in einem Knotenpunkt jedoch nur selten Anwendung in der Praxis. All diese Facettenfaltungen werden daher unter der Merkmalsausprägung Andere Facettenfaltung subsumiert.

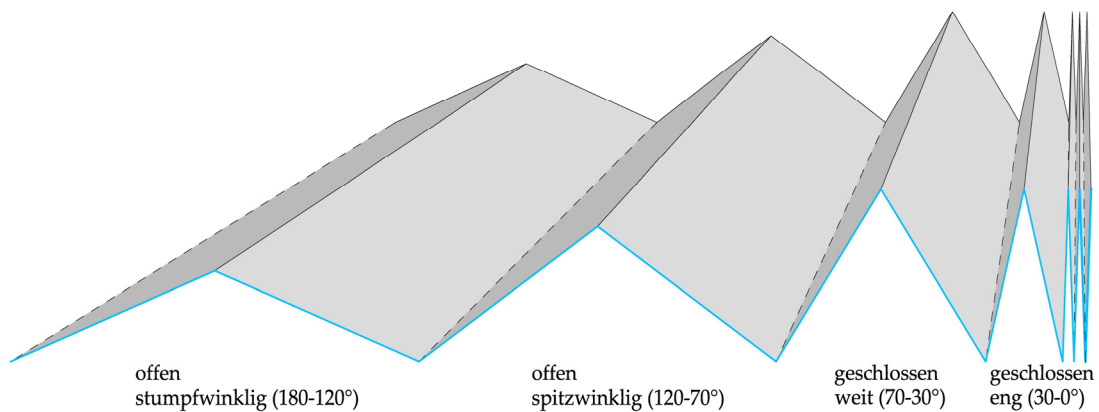
### 3.3.2 Geometrische Anordnung der Faltflächen

Neben der geometrischen Anordnung der Faltkanten und ihrer Schnittpunkte zueinander stellt die Grundkonstellation der Faltflächen den Ausgangspunkt für (weitere) wichtige Merkmale ausgehend von der geometrischen Durchbildung dar. Erst unter Zuhilfenahme dieser Merkmale lassen sich Faltstrukturen geometrisch einordnen.

Zu den sichtbarsten Merkmalen ausgehend von der Grundkonstellation der Faltflächen zählen

- Faltungszustand,
- Größenordnung der Faltstruktur,
- Faltensymmetrie,
- Neigungswinkel der Faltung,
- Faltkantenform, sowie
- Faltenanordnung.

Faltungszustand bezieht sich auf den Öffnungswinkel der Faltung. Der Öffnungswinkel ist der Winkel zwischen den Tangenten zweier nebeneinanderliegender Wendepunkte (Abb.3.8). Wendepunkte sind dabei die Punkte, in denen sich der Krümmungssinn der Falte von einer konvexen zu einer konkaven Kurve ändert. In der Strukturgeologie unterscheidet man vier Klassen: offene stumpfwinklige Falten ( $180-120^\circ$ ), offene spitzwinklige Falten ( $120-70^\circ$ ), geschlossene Falten ( $70-30^\circ$ ) und enge Falten ( $30-0^\circ$ ), [[92] Hansen 1971]. Im hier vorliegenden Morphologischen Kasten werden in Anlehnung an diese Klassifizierung aus der Strukturgeologie die vier Merkmalausprägungen des Merkmals Faltungszustand definiert: offen (stumpfwinklig), offen (spitzwinklig), geschlossen (weit), geschlossen (eng) (Abb. 3.9). Eine Quantifizierung der vier Ausprägungen kann mittels präziser Angabe des Öffnungswinkels der Faltung erreicht werden. Diese kann v.a. bei kinematischen bzw. wandelbaren Faltstrukturen nötig sein, bei welchen durch die Bewegung ein Faltprozess eingeleitet wird, welcher das Entfalten (Öffnen) oder das Zusammenfallen (Schließen) der Struktur bewirkt.



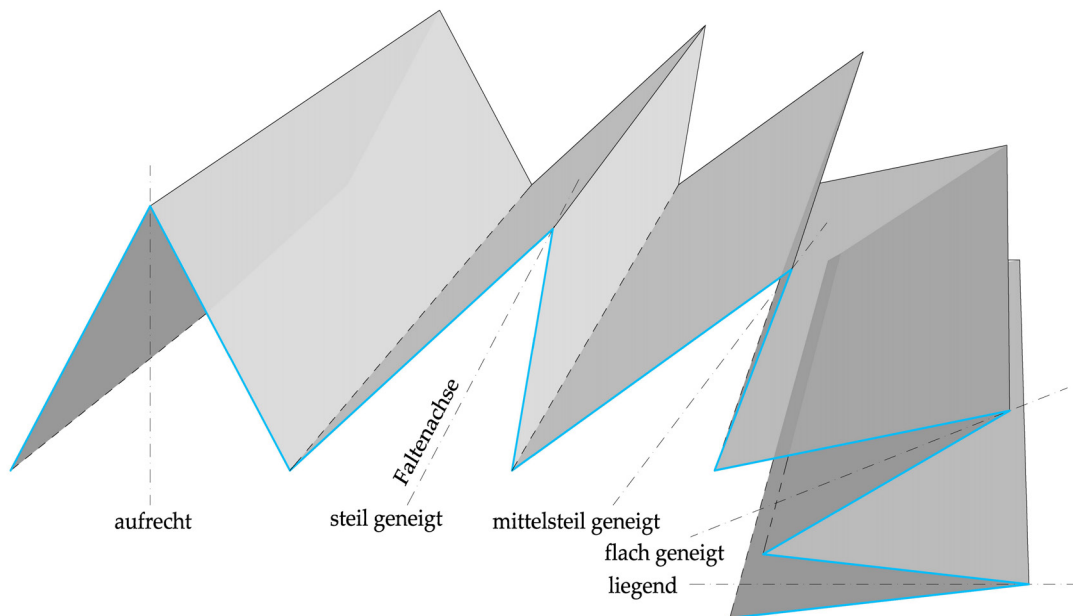
**Abbildung 3.9** Faltungszustand ausgehend vom Öffnungswinkel der Faltung

Größenordnung ist eines der sichtbarsten Merkmale von Faltstrukturen. Ausgehend von der menschlichen Körpergröße werden an dieser Stelle drei Maßstabsebenen von Faltstrukturen festgelegt und als Merkmalsausprägungen definiert. Die Größenordnung „mikro“ bezeichnet Faltstrukturgrößen bis 10 cm. Bei Faltstrukturen der Größenordnung „meso“ handelt es sich um Strukturen bis zu 1 m. Deutlich größere Faltstrukturen von über 1 m werden hier als „makro“ eingestuft. Diese drei definierten Größenordnungen sind im Hinblick auf textile Gebäudehüllen generell gut anwendbar. Im Einzelfall aber ist die eingesetzte Größenordnung der Faltstrukturen neben Gestaltungsaspekten auch von den Materialeigenschaften wie Steifigkeit, Elastizität, Dicke, sowie vom Faltpattern und von der Falstechnik abhängig.

Faltstrukturen lassen sich nach der Art der Faltsymmetrie in symmetrische und asymmetrische Haupttypen einteilen, die mittels Reihung, Rotation oder spiegelbildlicher Anordnung entstehen. Symmetrische (gleichschenkelige) Faltstrukturen

entstehen, wenn die Achsenebene der Falten im  $90^\circ$ -Winkel den halben Öffnungswinkel schneidet. Damit liegt der Faltenspiegel senkrecht zu den Schenkelflächen und die beiden Faltenschenkel sind gleich lang. Sind die Faltenschenkel dagegen ungleich lang, so bildet sich eine asymmetrische (ungleichschenklige) Falte heraus. Nach dem Gesetz der Symmetrie unterstützt eine symmetrische Anordnung die klare Gliederung von Inhalten und zieht die Aufmerksamkeit des Betrachters spürbar auf sich. Man spricht im gestaltpsychologischen Sinn von einer wohlgeformten Balance der visuellen Elemente [[86] Jackson 2011].

Der Neigungswinkel der Faltung bezieht sich auf die Position der Faltflächen zueinander. Grundsätzlich kann zwischen aufrechten, geneigten und liegenden Faltstrukturen unterschieden werden. Eine Quantifizierung der Ausprägungen kann mittels präziser Angabe des Neigungswinkels der Faltung erreicht werden. Dieser wird über die Position der Faltenachse definiert. Faltstrukturen mit vertikal aufrechter Faltenachse ( $80-90^\circ$ ) werden als aufrechte oder stehende Falten bezeichnet. Geneigte Falten sind Falten mit einfallender Faltenachse ( $80-10^\circ$ ). Ist der Neigungswinkel der Faltenachse kleiner als  $10^\circ$  bzw. weist diese eine subhorizontale Achsenebene auf, so handelt es sich um liegende Faltstrukturen (Abb. 3.10). In der Strukturgeologie werden geneigte Faltungen nochmals detaillierter abgestuft als steil geneigte Falten ( $80-60^\circ$ ), mittelsteil geneigte Falten ( $60-30^\circ$ ) und flach geneigte Falten ( $30-10^\circ$ ) [[93] Eisbacher 1996]. Im hier vorliegenden Morphologischen Kasten werden alle fünf genannten Faltungsarten in Abhängigkeit vom Neigungswinkel als Merkmalsausprägungen definiert.



**Abbildung 3.10** Neigungswinkel der Faltung

Im Hinblick auf die Faltkantenform als systematisierendes Merkmal lassen sich grundsätzlich Faltstrukturen mit scharf gekanteten oder mit weichen, rund gebogenen Faltkanten ausformen. Erstere werden in [[83] Baraj/et.al. 2013] auch als diskret bezeichnet. Sie können unter anderem durch Abkanten steifer Materialien, Pressen, und Verbinden zuvor separater Flächen entstehen. Weiche Faltkanten, auch abgerundete bzw. ondulierende Faltkanten genannt, können beispielweise durch die Verformung biegeweicher und elastischer Materialien herbeigeführt werden. Bei beschichteten textilen Werkstoffen die Anwendung in der Architektur finden, lassen sich Faltstrukturen mit scharfen Faltkanten nur mit der folgenden Einschränkung einsetzen: Durch die mechanische Profilierung der Faltkanten mittels Druck- oder Hitzeeinwirkung können Gewebefaser und die Beschichtung des Gewebes beschädigt werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird besonderes Augenmerk auf Faltstrukturen mit weich profilierten Faltkanten gelegt, die beispielweise durch einfache Raffsysteme erzeugt werden können. Eine weitergehende Auseinandersetzung mit gerafften Faltstrukturen erfolgt in Kap. 4.2.1.

Faltenanordnung als systematisierendes Merkmal bezieht sich auf die Anordnung der einzelnen Faltelemente zueinander. Deren Abstände und Neigungen zueinander können grundsätzlich gleichmäßig, regelmäßig oder unregelmäßig sein. Das mit der Faltenanordnung zusammenhängende Repetitionspotenzial ist entscheidend für die Frage, inwieweit eine Faltstruktur besonders wirtschaftlich, d.h. mit möglichst vielen geometrisch gleichen oder zumindest ähnlichen Elementen hergestellt werden kann.

Die geometrische Durchbildung einer Faltstruktur kann zu Zwecken, die über diejenigen der Systematisierung von Faltstrukturen in einem Morphologischen Kasten hinausgehen, geometrisch präzise anhand eines Faltungssprofils abgebildet werden. Das Faltungssprofil ist der schematische Querschnitt einer Faltung, der senkrecht zur Faltenachse verläuft. Die präzise Abbildung der Geometrie anhand eines solchen Faltungssprofils ist bspw. für den Herstellungsprozess notwendig. Die im Folgenden vorgeschlagene Terminologie für die Beschreibung eines Faltungssprofils (Abb. 3.11 und anschließende Erläuterung der Begrifflichkeiten) versteht sich als optionale Ergänzung zu den Merkmalen und Merkmalsausprägungen hinsichtlich geometrischer Durchbildung von Faltungsstrukturen. Sie ist teilweise an Arbeiten aus der Strukturgeologie angelehnt [[94] Burg 2001], [[92] Hansen 1971], [[93] Eisbacher 1996].

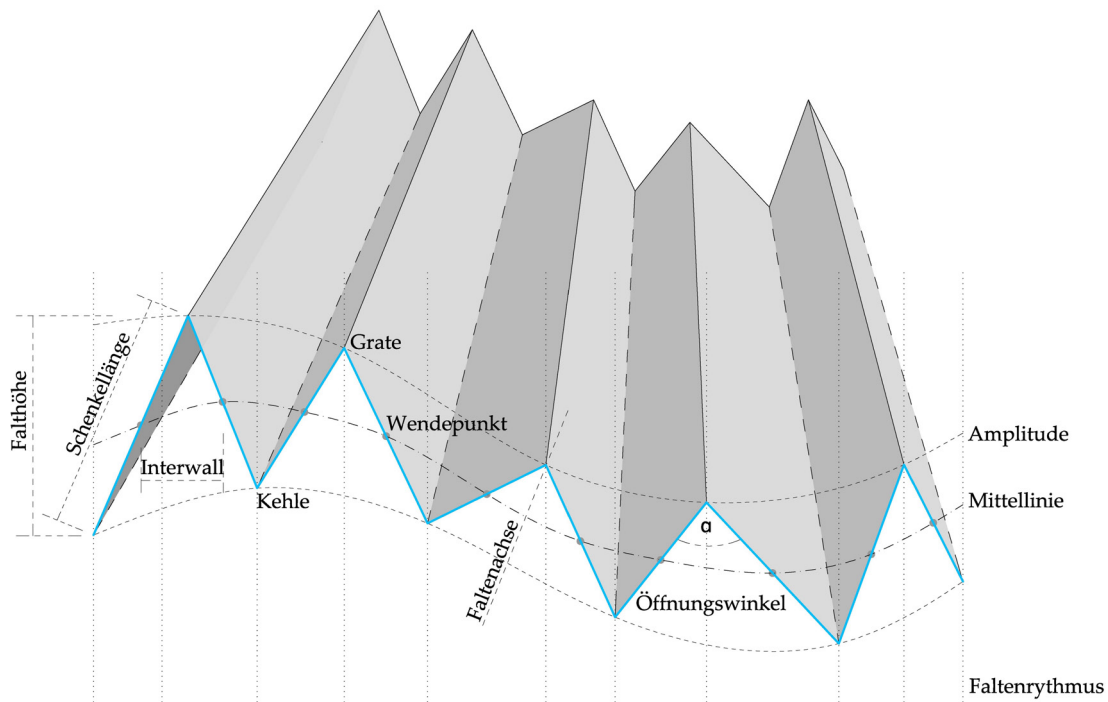


Abbildung 3.11 Faltungsprofil

- **Grate** bezeichnet den höchsten Punkt einer Falte und bildet eine nach oben konvexe Antiform, die Bergfalte.
- **Kehle** ist der tiefste Punkt einer Falte und bildet eine nach unten konkave Synform, die Talfalte.
- **Wendepunkte** sind Punkte, in denen sich der Krümmungssinn der Falte von einer konvexen zu einer konkaven Kurve ändert.
- **Faltenachse** halbiert den Öffnungswinkel der Falte und ist nur in der Vorstellung als eine gedachte Hilfskonstruktion vorhanden.
- **Faltenhöhe** wird auch als Amplitude bezeichnet und ist die Distanz, die entlang der Faltachse vom höchsten zum tiefsten Punkt der Falte gemessen wird.
- **Schenkellänge** ist der Abschnitt der Falte, der vom höchsten Punkt über den Wendepunkt bis zum tiefsten Punkt der Falte verläuft. Sind beide Faltenschenkel gleich lang, bilden sie symmetrische Falten. Ungleich lange Faltenschenkel ergeben asymmetrische Falten.
- **Intervall** der Falte bestimmt den horizontalen Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wendepunkten des Faltprofils.
- **Mittellinie** verbindet die Wendepunkte miteinander.
- **Faltungsfrequenz** bezeichnet die Wiederholung der Faltung im bestimmten Rhythmus.
- **Faltenrhythmus** entsteht durch Variieren des Abstandes zwischen den Brüchen einer Faltenfolge.
- **Vergenz** bezeichnet die Richtung der Neigung von geneigten Falten

### 3.4 Materialsteifigkeit und Materialverbrauch

Die Möglichkeiten zur Herstellung von Faltstrukturen sind von den zugrundeliegenden Materialeigenschaften und den mit diesen einhergehenden urformenden Fertigungsverfahren abhängig. Insbesondere die Materialsteifigkeit ist mit den Ausformungsmöglichkeiten einer Faltstruktur verbunden. Als Ausprägungen des Merkmals werden hier steif und flexibel definiert, wobei Bezug auf die Biegesteifigkeit des Materials genommen wird. Die Dehn- und Torsionssteifigkeit des Materials ist bei der Umsetzung von Faltstrukturen weniger maßgeblich und daher nicht als explizites Merkmal an dieser Stelle definiert. Für unbewegliche Faltstrukturen werden meist biegesteife Materialien verwendet, während bewegliche Faltstrukturen sowohl aus steifen, wie auch aus flexiblen bzw. biegeweichen Materialien umgesetzt werden können. Bewegungen faltbarer Strukturen aus steifen Flächensegmenten, die keine ausreichende Materialverformung zulassen, werden größtenteils über Gelenke realisiert (siehe Merkmal Konstruktive Durchbildung). Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit werden unbewegliche Faltstrukturen aus biegeweichen Materialien (Bautextilien) untersucht, die im Bereich der Gebäudehülle bisher noch keine nennenswerte Anwendung fanden. Dabei ergeben sich durch die Kombination biegeweicher Materialien in gefalteter Form mit anderen Funktionsmaterialien neue Möglichkeiten für das Bauen mit textilen Materialien im Bereich der Gebäudehülle.

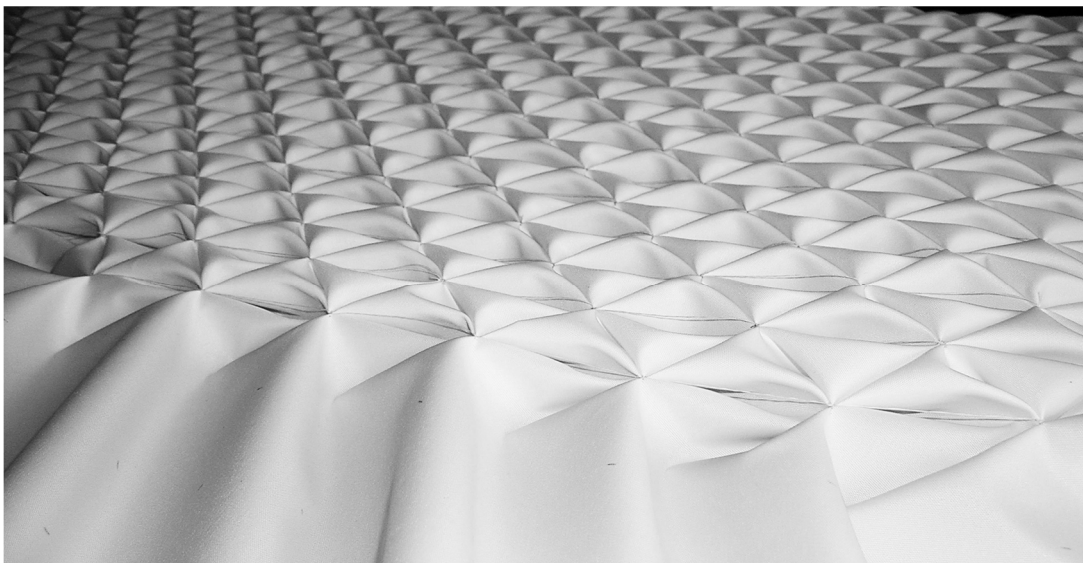
Der Materialverbrauch bei der Herstellung von Faltstrukturen hängt im Wesentlichen von der Geometrie und der technischen Anwendung der Faltstruktur ab. Je nach Form und Funktion können sich Faltstrukturen und somit das Material einfach oder mehrfach überlagern. Damit benötigen gefaltete Oberflächen zwar ggf. größere Materialmengen, doch die Strukturierung der Oberfläche kann sich positiv auf andere Anforderungen, wie beispielweise die Schallbeugung, auswirken. Im Hinblick auf die Gestaltung entsteht durch Faltung eine räumlich-plastische Oberfläche aus einem Materialkontinuum ohne kompliziertes Aufbauverfahren. Einfacher Materialverbrauch, der sich durch eine einlagige Oberfläche ergibt, wird meist bei der Bespannung wandelbarer Konstruktionen gewählt. Bei facettierten Faltstrukturen entstehen Materialüberlagerungen, die zu einem zwei- oder dreifachen, oder auch darüber hinaus mehrfachen Materialverbrauch führen können und dabei innerhalb einer Struktur variieren können. Ebenso sind facettierte Faltstrukturen mit Materialverbräuchen mit jeglichen Nachkommastellen wie bspw. 1,5- oder 2,3-facher Verbrauch möglich. Entsprechend sind die hier definierten Ausprägungen des Merkmals Materialverbrauch – einfach, zweifach, dreifach und mehrfach – als Näherungswerte vor dem Hintergrund einer handhabbaren Systematisierung zu interpretieren.

### 3.5 Falttechniken und Formstabilisierungsmethoden

Faltstrukturen können mittels verschiedener Falttechniken herbeigeführt werden. Die gängigsten Techniken und damit gleichzeitig die Ausprägungen des Merkmals Falttechnik sind plastische und elastische Umformung des Materials, sowie Zusammenfügung einzelner Elemente beispielweise mithilfe von gelenkigen Komponenten.

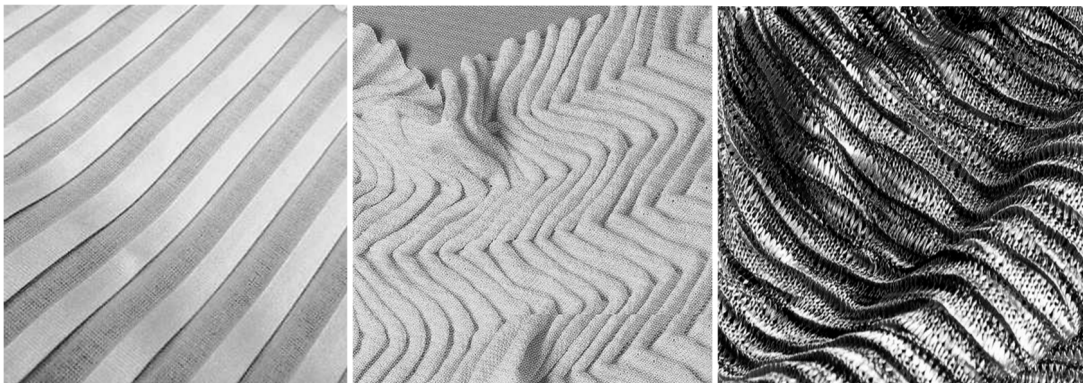
Plastische Umformung mittels Nähen ist die einfachste Methode, um eine Falte in Stoff zu halten ohne dass sie aufgeht. Nähen ist besonders bei Längsfaltungen – unabhängig vom Neigungsgrad der Faltung – eine gute Lösung, sofern sich die Falten nicht berühren. Denn jede Falte kann dann unabhängig von den anderen Falten genäht werden. Das Abnähen kann dicht an den Faltkanten oder in einiger Entfernung davon erfolgen [[85] Jackson 2015]. Auch punktuell geraffte Faltstrukturen (Abb. 3.11) können mit industriellen Nähmaschinen angefertigt werden. Allerdings ist hier eine Umrüstung bzw. Umprogrammierung der Nähmaschine je nach Raffstruktur und Materialeigenschaften erforderlich. In einem Expertengespräch mit der Firma Konrad Busche GmbH & Co. KG, einem Spezialisten aus dem Bereich der nähenden Industrie, wurde die plastische Umformung mittels Nähen für die Faltstrukturen 1, 2 und 3 aus Kap. 4.2 erörtert, jedoch aus finanziellen Gründen nicht durchgeführt.

Auch komplizierte, rautenförmige Facettenfaltungen, bei denen sich Berg- und Tal-falten miteinander kreuzen, lassen sich mittels Nähen erzeugen. Zu beachten ist, dass Nähte, die aus verschiedenen Richtungen zusammenlaufen, leicht den Knotenpunkt aus seiner Form bringen können. Daher werden zuerst die an den Knoten zusammenlaufenden Bergfalten genäht. Die Tal-falten entstehen, indem der Stoff umgedreht und die Faltkanten als Bergfalten vernäht werden [[95] Singer 2014] (Abb. 3.12).



**Abbildung 3.12** V-förmige Facettenfaltung erzeugt durch punktuelle Raffungen (Rückseite)

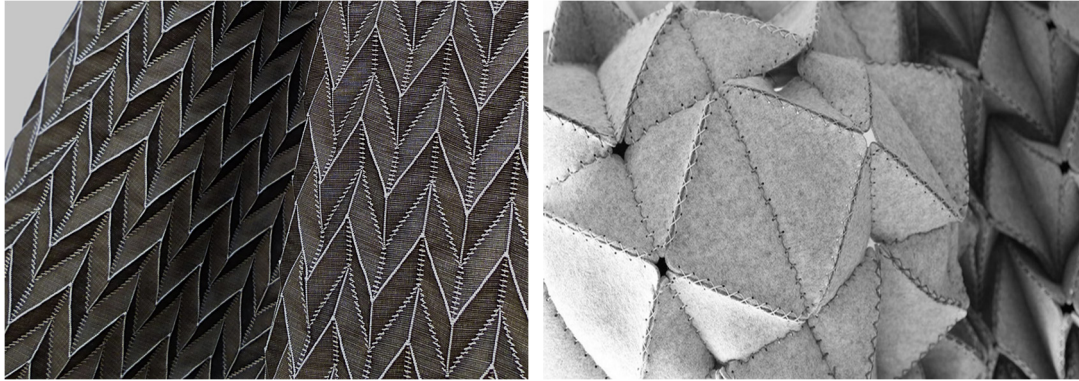
Neben der plastischen Umformung mittels Nähen lassen sich bei textilen Geweben kleinere Faltstrukturen (bis ca. 3 cm Größe) auch bereits direkt beim maschinellen Web-, Strick-, bzw. Wirkverfahren mittels einer besonderen Bindungstechnik herstellen [[26] Wagner 1987] (Abb. 3.13). Bei den für das Textile Bauen interessantesten – den gewebten Faltstrukturen, unterscheidet man prinzipiell zwei Grundtypen von Falten: Falten mit ungleichmäßigen, blasenartigen Effekten, sowie glatte Falten. Glatte Falten entstehen, wenn mit zwei Ketten (Grund- und Faltenkette) und einem Schuss gearbeitet wird. Die Grundkette wird dabei straff, die Faltenkette gleichzeitig etwas lockerer gespannt. Der Schuss bindet mit beiden Ketten das Grundgewebe. Wenn der Schuss nur mit den Faltenkettfäden bindet, entsteht bei diesem Vorgang eine Falte. Die Grundkette bindet dabei immer tiefer, d.h. die Grundkettfäden liegen immer auf der Rückseite. Der Wechsel von eng verkreuzenden und flottierenden Fäden bewirkt ein Aufwerfen der Rippen, d.h. Falten [[26] Wagner 1987]. Gewebte Längsfalten können auch auf der Grundlage von schattierenden Bindungen hergestellt werden. Dabei geht man innerhalb eines Rapportes kontinuierlich von der Kett- in die Schussbindung über und wechselt zusätzlich die Gradrichtung. Die stärkeren Kettfäden schieben das Gewebe zusammen und bilden so die Längsfalte.



**Abbildung 3.13** Maschinell gewebte, gestrickte und gewirkte Falten, aus [26]

Die elastische Umformung von textilen Strukturen kann direkt beim Webvorgang ausgeführt werden. Werden Kettfäden verschiedener Elastizität streifenweise nebeneinander verwendet, so ziehen sich nach der Abnahme des Gewebes von der Webmaschine die elastischen Kettfäden mehr zusammen als die glatten Kettfäden. Dadurch wird dem Gewebe ein unregelmäßig plastisches, faltenartiges Aussehen verliehen [[96] Hennig 1978]. Das Textil „*Origami*“ (Abb. 3.14), entwickelt von Tobias Batrla, basiert auf dieser Idee. Es wurde mit dem Red Dot Award 2013 ausgezeichnet [[97] Batrla 2013]. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von verschieden stark gedrehten Garnen bei Kette und Schuss. Bei der Appretur des Gewebes entsteht eine blasenartige Stofftextur, die auch als Rindenborkenkreppe bezeichnet wird. Des Weiteren können textile Strukturen elastisch umgeformt werden, indem wiederum bereits direkt beim Webvorgang ein Faltmuster vordefiniert

wird und darauf mit einem elastischen Schrumpfgarn dreidimensionale Effekte ausgearbeitet werden. Eine detaillierte Beschreibung der Produktionstechniken bei Faltengeweben und der dazugehörigen Bindungspatronen ist in [[98] Kienbaum 1996] zu finden.



**Abbildung 3.14** Textiles Origami, Tobias Batrla, 2013, aus [94]

**Abbildung 3.15** Rautenförmige Facettenfaltung zusammengesetzt (vernäht) aus einzelnen Flächenelementen, 2012

Die Zusammenfügung von Komponenten mithilfe gelenkartiger Verbindungselemente ist eine weitere Technik zur Herstellung von Faltstrukturen. Über gelenkartige Verbindungselemente werden meistens bewegliche Faltstrukturen aus steifen Flächensegmenten realisiert, die ansonsten keine ausreichende Materialverformung zulassen. Ebenso können unbewegliche Faltstrukturen aus textilen Werkstoffen aus einzelnen modularen Elementen bzw. Flächensegmenten mit entsprechender Verbindung zusammengesetzt werden (Abb. 3.15). Da mittels Zusammenfügung auch unterschiedlich geformte textile Applikationen auf einer glatten Materiallage aufgesetzt werden können, ermöglicht es diese Faltechnik, mit relativ einfachen Mitteln interessante Oberflächenartikulationen zu gestalten (siehe Gestaltungsstudien in Kap. 4.2.3).

Um Faltstrukturen zu stabilisieren bzw. an gewünschter Position und Stelle zu halten, bedürfen manche Strukturformen zusätzlicher Maßnahmen, die allen voran von der Materialsteifigkeit und der Oberflächenbeschaffenheit des Materials abhängig sind. Zu den gängigsten Stabilisierungsmethoden zählen die thermische Fixierung, die Infusion von Harzen und die Kombination aus verschiedenen Ansätzen.

Thermische Fixierung erfolgt traditionell mittels Druck, Temperatur und Wasserdampf. Dauerhafte Falten werden mittels dieser Faltechnik allerdings nur bei Stoffen aus Kunstfasern erreicht. Dies liegt daran, dass die hohe Temperatur der Luft bzw. des Dampfes die Fasern, die in eine Faltenform gepresst werden, zum Schmelzen bringt. Bei rein thermoplastisch hergestellten Materialien wie bspw. Polyester könnte theoretisch auf den Einsatz von Wasserdampf verzichtet werden, da diese Materialien auch rein thermoplastisch verformt werden könnten. Die

Schmelztemperatur von Polyesterfasern liegt normalerweise im Bereich von ca. 230°C [[99] Cherif 2011].

Bautextilien mit thermoplastischer Beschichtung lassen sich durch Hitze in Kombination mit Druck gezielt verformen, sodass ein Faltmuster stabilisiert werden kann. Ähnlich wie bei einem Schweißvorgang wird die im Textilbau dafür benötigte Hitze durch hochfrequente Strahlung, Heizelemente, oder auch Stromimpulse aufgebracht. Die Festigkeit der thermischen Fixierung ist abhängig vom Anpressdruck sowie von der Pressform, Verarbeitungstemperatur und Anpressdauer.

Faltstrukturen aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe lassen sich gut durch hochfrequente Strahlung stabilisieren, indem die Materiallagen dazu gebracht werden, miteinander punktuell zu verschmelzen. Die hochfrequente Strahlung setzt bestimmte molekulare Gruppen in der Beschichtung in Schwingung, was zu einer starken Wärmeentwicklung und damit zum Verbinden der Moleküle miteinander führt [[97] Seidel 2008]. Materialien mit PTFE-Beschichtungen können durch direktes Aufbringen von Hitze miteinander verschweißt werden, wodurch etwaige Faltmuster dauerhaft stabilisiert werden können. Dabei verbindet ein Heizbalken bei ca. 340 °C die Beschichtung der Membran mit einer Zwischenfolie aus thermoplastischem Fluorkunststoff. Bei einem Anpressdruck von etwa 50 N/cm<sup>2</sup> über eine Zeitdauer von 40 Sek. und anschließendem langsamen Abkühlen unter Druck erreicht die Schweißnaht ca. 90% der Materialfestigkeit [[100] Seidel 2008].

Mittels Infusion von Harzen können Faltstrukturen aus unbeschichteten Geweben stabilisiert und dabei gleichzeitig eine wasserundurchlässige Schicht an der Oberfläche generiert werden. Im Rahmen der Gestaltungsstudien zur Faltenbildung in Kap. 4 wurden ausgewählte Faltstrukturen zuerst aus reinem Polyesterstoff erzeugt und anschließend zu Stabilisierungszwecken in einer Epoxidlösung getränkt. Hierzu wurde basierend auf dem Epoxid-Laminierharz-System 385 (LR-Laminierharz mit LH-Laminierhärter, Hersteller: Siebert Luftfahrtbedarf) eine durchsichtige Flüssigkeitsmischung im Mischungsverhältnis LR 100 zu LH 35 erstellt. Die Beschichtung härtet bei Raumtemperatur von ca. 20°C nach 24 Stunden aus, sodass nach dieser Zeit die eingetränkten Faltstrukturen Formstabilität erlangt haben. Der Nachteil der Infusion von Harzen ist, dass die Faltstruktur hart und brüchig wird. Sie verliert somit ihren stofflichen Charakter und ähnelt vielmehr einer glänzenden, strukturierteren Kunststoffoberfläche (Abb. 3.16), die aber dafür im Bereich der Gebäudehülle bestens als wasserundurchlässige Schicht eingesetzt werden.



**Abbildung 3.16** Formstabilisierung durch die Infusion von Epoxidharz

Weitere Stabilisierungsmethoden können mithilfe von Befestigungselementen wie Druckknöpfen, Klettband, Nieten, Magneten, etc. erreicht werden. Zielführend ist insbesondere die Kombination verschiedener Ansätze sein. So ermöglicht beispielsweise die Verwendung eines Drahtgitters, dass alle Knotenpunkte einer Faltstruktur an der Rückseite über gelenkige Verbindungselemente in fester Position gehalten werden. Durch das anschließende Befüllen dieser Faltstruktur mit einem Granulat besteht die Möglichkeit, die Faltstruktur aus biegeweichen Materialien einerseits zu stabilisieren und andererseits die Füllung für bauphysikalische Zwecke zu nutzen. Analog ist beispielweise auch die Kombination aus punktuellen Raffern und der nachträglichen Behandlung mit Harzen möglich. Zu beachten ist jedoch, dass sich nicht jede Faltstruktur befüllen lässt. Auch das Gewicht der implementierten Materialien ist zu berücksichtigen, sowie das ggf. notwendige, zusätzliche Aufbringen einer Materialabdecklage im Aufbausystem.

## 4 Übertragung von Faltstrukturen auf textile Werkstoffe

Die Umsetzung von Faltstrukturen in textilen Werkstoffen erfordert ein grundlegendes Wissen über die materialspezifischen Eigenschaften faltbarer textiler Werkstoffe, die sich im Bauwesen verwenden lassen. Aufbauend auf der Schaffung dieses Wissens in Kap. 4.1 werden in Kap. 4.2 Gestaltungsstudien zur Faltenbildung im Textil vorgenommen. Im Fokus stehen Faltungen, die mittels Verknotung, Verflechtung oder Verdrehung des Materials unterschiedliche geometrische Muster bilden. Die gestalteten Oberflächenstrukturen zeichnen sich durch die Anwendung einfacher Falttechniken aus, die eine variable Größe der Struktur, sowie eine leichte Applikation des Musters auf textile Werkstoffe zulassen. Die in Kap. 4.2. durchgeführte prototypische Umsetzung ausgewählter Faltstrukturen im Maßstab 1:1 erlaubt die Analyse wesentlicher Gestaltungsparameter und optischer Wahrnehmungseffekte. Es werden jeweils Einflussfaktoren auf den Gestaltungsraum evaluiert und parametrisiert, um auf diese Weise ein tiefgehendes Verständnis für Faltengeometrie und Materialität zu entwickeln.

### 4.1 Materialspezifische Eigenschaften textiler Werkstoffe

Die im Membranbau verwendeten Materialien lassen sich in zwei Gruppen einteilen: technische Gewebe und Folien. Aufgrund ihrer vielfältigen Materialeigenschaften werden bei der textilen Gebäudehülle üblicherweise Gewebe verwendet. Entsprechend werden auch für die Gestaltungsstudien zur Faltenbildung in Kap. 4.2. bestimmte Gewebe verwendet. Grundlegendes Wissen über die materialspezifischen Eigenschaften textiler Werkstoffe wird in [[101] Knippers/et al. 2010], [[102] Moritz 2003] und [[103] Pudenz 2004] vermittelt. Die verschiedenen beschichteten und unbeschichteten technischen Gewebe besitzen durch die unterschiedlichen Steifigkeiten der beiden Fadenrichtungen des Gewebes ein ausgeprägtes anisotropes Materialverhalten. Im Hinblick auf die Faltenerzeugung spielen die drei Materialspezifikationen *Faltbarkeit*, *Knickbeständigkeit* und *Lichtdurchlässigkeit* die entscheidende Rolle. Sie sind besonders gut ausgeprägt bei PVC-(Polyvinylchlorid-)beschichtetem und unbeschichtetem Polyestergewebe, sowie bei beschichtetem und unbeschichtetem PTFE-(Polytetrafluorethylen-)Gewebe. Bei den beschichteten Geweben, d.h. den Verbundwerkstoffen, übernimmt das aus hoch-festen Fasern bestehende Gewebe im Verbund die Funktion der Lastabtragung. Die Beschichtung schützt das Gewebe vor eventueller mechanischer, chemischer oder biologischer Beschädigung und gewährleistet die erforderliche Dichtigkeit gegen Feuchtigkeit und Luft. Sie bestimmt zudem die Transparenz des Materials.

##### 4.1.1 Struktureller Aufbau von Geweben

Die kleinste textile Einheit im Aufbau von Geweben ist die Faser. Die einzelnen unterschiedlichen Faserarten lassen sich grob den beiden Gruppen Naturfasern und Chemiefasern zuordnen. Naturfasern entstehen durch natürliche Wachstums- und Faserbildungsprozesse. Sie haben eine begrenzte Länge und werden zu Spinnfasern verarbeitet. Chemiefasern werden hingegen industriell hergestellt und lassen sich in Fasern aus synthetischen Polymeren wie z.B. Polyesterfasern, und Fasern aus anorganischen Rohstoffen wie z.B. Glasfasern oder Kohlenstofffasern, unterteilen. Chemiefasern können mit unterschiedlichen Spinnverfahren theoretisch in endloser Länge (Filamente) gewonnen werden [[104] Sobek/Speth 1995], [[105] Hofer 1987]. Während des Herstellungsprozesses werden Fasern zunächst zu Garnen zusammengefasst. Garne dienen als Ausgangsprodukt für die Herstellung von Geleugen, Geweben, Gewirken und Gestricken. Die Produkte lassen sich drei Gruppen zuordnen: Maschenwaren (Gewirke, Gestricke), Webwaren (Gewebe und Nähgewebe) und Non-Wovens (Vliese, Filze, Fadengelege).

Ein Garn entsteht durch das Zusammenführen einzelner Filamente bzw. Spinnfäden. Die Fäden werden üblicherweise aus mehreren hundert miteinander verdrehten Einzelfasern gebildet [[106] Orpana/Houtman 2000]. Der Faden steht als Oberbegriff für alle aus Fasern bestehenden, linienförmigen Gebilde (Filamente, Monofile, Garne und Zwirne). Werden Fasern synthetisch hergestellt und sind somit potentiell endlos, bezeichnet man die aus ihnen gebildeten Fäden als Filamente. Wird der Faden aus nur einer synthetisch hergestellten Faser gebildet, so handelt es sich um ein Monofil. Ein Zwirn wiederum entsteht durch das Zusammendrehen von mindestens zwei Garnen; Ein mehrstufiger Zwirn durch Zusammendrehen von einzelnen Zwirnen in einem Zwirnvorgang. Das Verdrehen der Fasern beeinflusst das Kraft-Dehn-Verhalten der Fäden. Je stärker die einzelnen Fasern verdreht sind, desto elastischer wird der Faden [[107] Falkai 1981].

Der Querschnitt einer Faser ist sehr gering und kann daher nur in einem relativ aufwendigen Verfahren bestimmt werden. Ebenso aufwendig ist die exakte Bestimmung der Spannungen in einem Gewebe. Daher hat sich im konstruktiven Textilbau anstelle der Spannungseinheit  $N/mm^2$  die Einheit  $N/5\text{ cm}$  zur Beschreibung der Materialfestigkeit nach DIN 53 354 durchgesetzt. In der Textilindustrie wird ein Filamentgarn über seine längenbezogene Masse (Feinheit), die Anzahl seiner Filamente und die Angabe über die Drehungen der Filamente pro Meter charakterisiert. Die Einheit der Feinheit ist das *tex* = Gewicht in Gramm pro 1.000 m Länge. Geläufig sind zumeist Angaben in *decitex*, kurz *dtex* = Gewicht in Gramm pro 10.000 m Länge. Ein Garn mit der Bezeichnung 1.100 *dtex* f 200 z 60 wiegt 1.100 g pro 10.000 m und besteht aus 200 Filamenten, welche 60 mal pro Meter rechtsinnig um die Garnachse (z-Richtung) miteinander verdreht sind [[102] Moritz 2003].

Als Oberbegriff für manuell oder maschinell gefertigte Erzeugnisse aus textilen Flächengebilden steht das Gewebe, das aus mindestens zwei rechtwinklig oder nahezu rechtwinklig verkreuzten Fadensystemen besteht. Die Fäden in Längsrichtung des Gewebes werden als Kette bzw. Kettfäden bezeichnet; Die Fäden in Quer- richtung als Schuss bzw. Schussfäden. Die Art der Verwebung von Kett- und Schussfäden ist die Bindung, welche zusammen mit der gewählten Fadendichte den wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Gewebes aus- übt. Prinzipiell unterscheidet man drei Grundbindungsarten – die Leinwandbil- dung, die Körperbindung und die Atlasbindung [[108] Hofer 1987]. Erstere und die von dieser abgeleitete Panamabildung werden aufgrund ihrer erhöhten Nahtfestig- keit am häufigsten beim Textilen Bauen angewandt. Ihre charakteristische Wellig- keit (sog. Crimp) erhalten die sich kreuzenden Fäden beim Webvorgang. Die Wel- ligkeit und somit die Spannungs-Dehnungs-Eigenschaften des Gewebes lassen sich beim Webvorgang in gewissen Grenzen über die Fadenvorspannung beeinflussen [[104] Sobek/Speth 1995].

#### **4.1.2 Beschichtete faltbare Textilien**

Um den vielfältigen Anforderungen zu genügen, die beim Textilen Bauen an Ge- webe gestellt werden, müssen diese weiteren Bearbeitungsstufen unterzogen wer- den (sog. Ausrüstung). Das Gewebe ist für die mechanischen Eigenschaften einer Membran maßgeblich. Diese Eigenschaften wie bspw. Weiterreißfestigkeit oder Dauerknickbeständigkeit können durch das Aufbringen einer entsprechenden Be- schichtung bzw. einer Oberflächenversiegelung beeinflusst werden. Die Beschich- tung verhindert zudem die Winkelverdrehung der einzelnen Gewebefäden und trägt zu einer Erhöhung der Membransteifigkeit bei. Die üblicherweise beidseitig aufgetragene Beschichtung (Coating) schützt das Gewebe vor Feuchtigkeit, UV- Strahlung, Feuer, Mikroben und Pilzbefall. Dadurch werden Anschmutzverhalten, Lebensdauer und auch die Brandeigenschaften des Rohgewebes erheblich verbes- sert. Erst die Beschichtung macht textile Flächen dauerhaft wasserdicht und erlaubt unterschiedliche Farbgebungen durch Bedrucken oder Beigabe von Pigmenten. Eine weitere wichtige Funktion der Beschichtung ist, dass sie die Verbindung meh- rerer Gewebeteilflächen mittels thermischer bzw. hochfrequenter Schweißverfahren ermöglicht [[104] Sobek/Speth 1995]. Ausnahme in dieser Hinsicht bilden Fluorpo- lymergewebe, bei welchen die Gewebefäden auch direkt, d.h. ohne eine entspre- chende Beschichtung, miteinander verschweißt werden können.

In der Regel werden Beschichtungen aus Polyvinylchlorid (PVC), Polytetrafluor- ethylen (PTFE) oder Silikon angewendet. Mit PTFE können allerdings nur Gewebe beschichtet werden, deren Faser eine Schmelztemperatur von über der des PTFE von ca. 327°C hat. Eine PTFE-Beschichtung von Polyestergewebe ist aus diesem Grund nicht möglich, da die Schmelztemperatur von Polyester zwischen 220 und

260°C liegt. PVC- ist in Relation zur PTFE-Beschichtung wesentlich empfindlicher gegenüber der natürlichen Bewitterung. Letztere durchläuft in einem Zeitraum von 25 bis 30 Jahren keinen signifikanten Alterungsprozess [[109] Mittlerer/Kaufman 2007].

Um die erforderliche Elastizität zu erreichen, werden PVC zu ca. 40 Gewichtsprozenten Weichmacher, sowie geringe Mengen an UV- und Hitzestabilisatoren beigemischt. Eine weitgehend gasdiffusionsdichte Oberflächenversiegelung, das Topcoating, reduziert das Ausdiffundieren der oben genannten Bestandteile und vermindert die Schädigung durch UV-Strahlung. Somit wird auch der langfristige Abbau der polymeren Struktur des PVC verhindert. Durch die Beimischung von Fungiziden soll mikrobiellem Bewuchs vorgebeugt werden. Zudem führen beigemischte Fungizide zu einer glatten und antiadhäsiven Beschichtung, was wiederum zu einer deutlichen Verbesserung des Anschmutzverhaltens führt. Um grundsätzlich einen besseren Oberflächenschutz zu bieten, können drei verschiedene Systeme der Oberflächenversiegelung angewendet werden: Acrylat-Lack, PVDF-Lack und PVF-Laminat [[110] Verseidag Industrietextilien GmbH 1993]. Das Topcoating kann ebenfalls bei PTFE angewendet werden. Hier kommen meistens FEP- oder PFA-Fluorkunststoffe zum Einsatz, welche die Antiadhäsivität, die mechanischen Eigenschaften der Oberflächen und die Schweißbarkeit verbessern [[110] Verseidag Industrietextilien GmbH 1993].

Für die Bildung von Faltstrukturen sind aus der Gruppe der beschichteten Gewebe besonders PES/PVC- und PTFE-Gewebe geeignet. Sie zeichnen sich durch vorteilhafte Materialeigenschaften wie gute Faltbarkeit, Knickbeständigkeit und Lichtdurchlässigkeit aus. Faltstrukturen mit weichen (ondulierenden) Faltkanten rufen beim Faltprozess keine mechanischen Beschädigungen der Beschichtung auf der Materialoberfläche hervor. Sie sind daher für den außenliegenden Bereich der Gebäudehülle besonders interessant.

**PES/PVC** (Polyvinylchlorid-beschichtetes Polyestergewebe) findet breite Anwendung bei textilen Gebäudehüllen. Aufgrund seiner hohen mechanischen Festigkeit und Knickbeständigkeit wird das Material bei wandelbaren, mobilen und permanenten Konstruktionen eingesetzt. Dank der geringen Rohmaterial- und Herstellungskosten ist PES/PVC einer der günstigsten Membranwerkstoffe. Die Lichttransmission beträgt bis zu 25% [[111] Koch 2004]. Der Wert ist bei offenporigem PES/PVC-Gittergewebe sogar höher, jedoch auf Kosten der Festigkeit. Als schwer entflammbarer Baustoff erreicht PES/PVC in der Regel die Brandschutzklasse DIN 4102-B1. Die extrem geringe Brandlast besteht u.a. infolge des geringen Flächengewichts und der geringen Materialstärke. Mithilfe einer Oberflächenversiegelung kann das Material dauerhaft vor Anschmutzen und vor vorzeitiger Alterung geschützt werden, sodass sich eine Lebensdauer von weit mehr als 20 Jahren ergibt.

Beim Recyclingkreislauf wird die Beschichtung vom eigentlichen Gewebe getrennt. PVC zerfällt unter Bildung von Chlor und Salzsäure. Polyester lässt sich dagegen einschmelzen oder in Form von Kurzfasern weiterverwenden. Ein Rücknahme-Netzwerk für den Werkstoff ist bereits vorhanden [[102] Moritz 2003].

**PTFE-Gewebe beschichtet** (Fluorpolymer-beschichtetes Polytetrafluorethylen-Gewebe) wird meist für hochwertige wandelbare Membrankonstruktionen eingesetzt. Das Material zeichnet sich durch höchste Faltbarkeit und Knickbeständigkeit, sowie eine sehr hohe Lichttransmission von bis zu 38% aus. PTFE-Gewebe lässt ausschließlich diffuses, also blendungsarmes Licht im Farbspektrum des Tageslichts hindurch, was als sehr angenehm wahrgenommen wird. PTFE-Fäden können problemlos gefärbt werden [[101] Knippers/et al. 2010]. Zudem weist das Material eine antiadhäsive Oberfläche auf und zählt als schwer entflammbarer Werkstoff zur Brandschutzklasse DIN 4102-B1 [[112] W.L. Gore & Associates GmbH 1993]. Aufgrund seiner festen Bindungsart ist PTFE-Gewebe extrem widerstandsfähig gegenüber chemischer und biologischer Beanspruchung, langfristig UV-stabil und witterungsbeständig. Das Gewebe an sich besteht aus derselben Fluorpolymerverbindung wie dessen Beschichtung. Das somit sortenreine Material zerfällt nicht, sondern wird bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor zersetzt.

#### 4.1.3 Unbeschichtete faltbare Textilien

Die Erzeugung von Faltstrukturen aus unbeschichteten Geweben erfordert grundsätzlich keine besonderen Maßnahmen. Die Ausmodellierung der Strukturen mit scharfkantigen Faltkanten kann bereits bei relativ geringem (händischem) Druck erfolgen. Faltungen in reinem Polyester müssen nachträglich thermisch stabilisiert werden. Unbeschichtete Gewebe behalten zudem stets ihren Gewebecharakter, den man im wörtlichen Sinn anfassen kann. Bei den Gestaltungsstudien zur Faltenbildung wurden reines Polyestergewebe (PES) und unbeschichtetes PTFE-Gewebe verwendet.

**PES-Gewebe unbeschichtet** (Polyestergewebe) ist wasserdurchlässig und daher in erster Linie für die Anwendung im Innenbereich geeignet. Das Material ist extrem leicht und weich. Die feinen Garne können so dicht verwebt werden, dass sie Wind und Regen abweisen, aber gleichzeitig dampfförmige Feuchtigkeit nach Außen durchlassen (atmungsaktive Funktion). Die Polyesterfasern sind hoch-reißfest (Reißlänge von ca. 40–55 km bei 15–25% Dehnung), schnittfest, gering dehnungsfähig und gering feuchtigkeitsaufnehmend. Damit ist PES-Gewebe insgesamt sehr strapazierfähig und knitterfest. Es ist zudem verrottungsbeständig und gegen chemischen, biologischen, klima- und lichtbedingten Einfluss resistent. Die Lichttransluzenz liegt im Bereich von 30-35%. PES schmilzt bei ca. 260°C und ist entflammbar, wobei es flammenhemmend ausgerüstet werden kann [[113] Krüger

2009]. Die Lebensdauer des Materials beträgt bei Freibewitterung 20-30 Jahre und erreicht somit eine 4- bis 6-fach höhere Lebenserwartung als Naturfasern [[109] Mitterer/Kaufman 2007].

**PTFE-Gewebe unbeschichtet** (Polytetrafluorethylen-Gewebe) hat eine sehr geringe Regendichtigkeit und eine gute UV-Beständigkeit. Als nicht brennbarer Werkstoff erreicht es das Prüfzeugnis DIN 4102-A2. Die Lichtdurchlässigkeit kann in Abhängigkeit von Materialart und -dicke 15-40% betragen. Aufgrund seiner antiadhäsiven Eigenschaften sind Anschmutzverhalten und Beständigkeit gegen Chemikalien sehr gut ausgebildet [[113] Krüger 2009]. Unter Dauerlast weist PTFE-Gewebe ausgeprägte Kriech- und Relaxationseigenschaften auf. Die Dauerknickbeständigkeit und die Abriebfestigkeit sind hervorragend, sodass PTFE-Gewebe häufig für hochwertige und faltbare Membrankonstruktionen mit geringer Anforderung an die Wasserdichtigkeit eingesetzt werden. Leichte PTFE-Gewebe mit sehr dichter Webart und beschichteten Fäden erreichen eine Wasserfestigkeit von bis zu 20 cm Wassersäule. Die Lebensdauer des Materials beträgt bei Freibewitterung mindestens 25 Jahre [[109] Mitterer/Kaufman 2007].

#### 4.2 Gestaltungsstudien zur Faltenbildung

Die in den folgenden Unterkapiteln diskutierten Gestaltungsstudien beziehen sich auf einen Ästhetik-Begriff, der die sinnliche Erfahrung ebenso wie die Vermittlung handwerklicher und künstlerischer Fertigkeiten umfasst. Es sind die visuellen wie auch die funktionalen Qualitäten des gewählten Materials, die einen hohen Aufforderungscharakter besitzen und individuelle Gestaltungsprozesse fördern. Alle Faltstrukturen haben eine starke, eigenständige Gestalt, sodass ggf. auch einzelne Parameter ihrer Geometrie in einem gewissen Rahmen an projektspezifische Bedingungen angepasst werden können, ohne dass dabei der architektonische Gesamtausdruck beeinträchtigt wird. Die verwendeten Faltechniken ermöglichen es, die Faltengeometrien rasch zu modellieren und ggf. in eine computergesteuerte Nähmaschine zu exportieren. Damit können bei Bedarf Entwurfs- und Produktionsprozesse rationalisiert werden. Im Rahmen der Gestaltungsstudien wurden fünf Facettenfaltungen mittels Raffung, zwei Facettenfaltung mittels Tessellation, sowie zwei Längsfaltungen mittels Trennen, Verformen und Zusammenfügen des Materials untersucht. Abb. 4.1 ordnet alle neun den Gestaltungsstudien zugrundeliegenden Faltstrukturen im Morphologischen Kasten aus Kap. 3 ein.

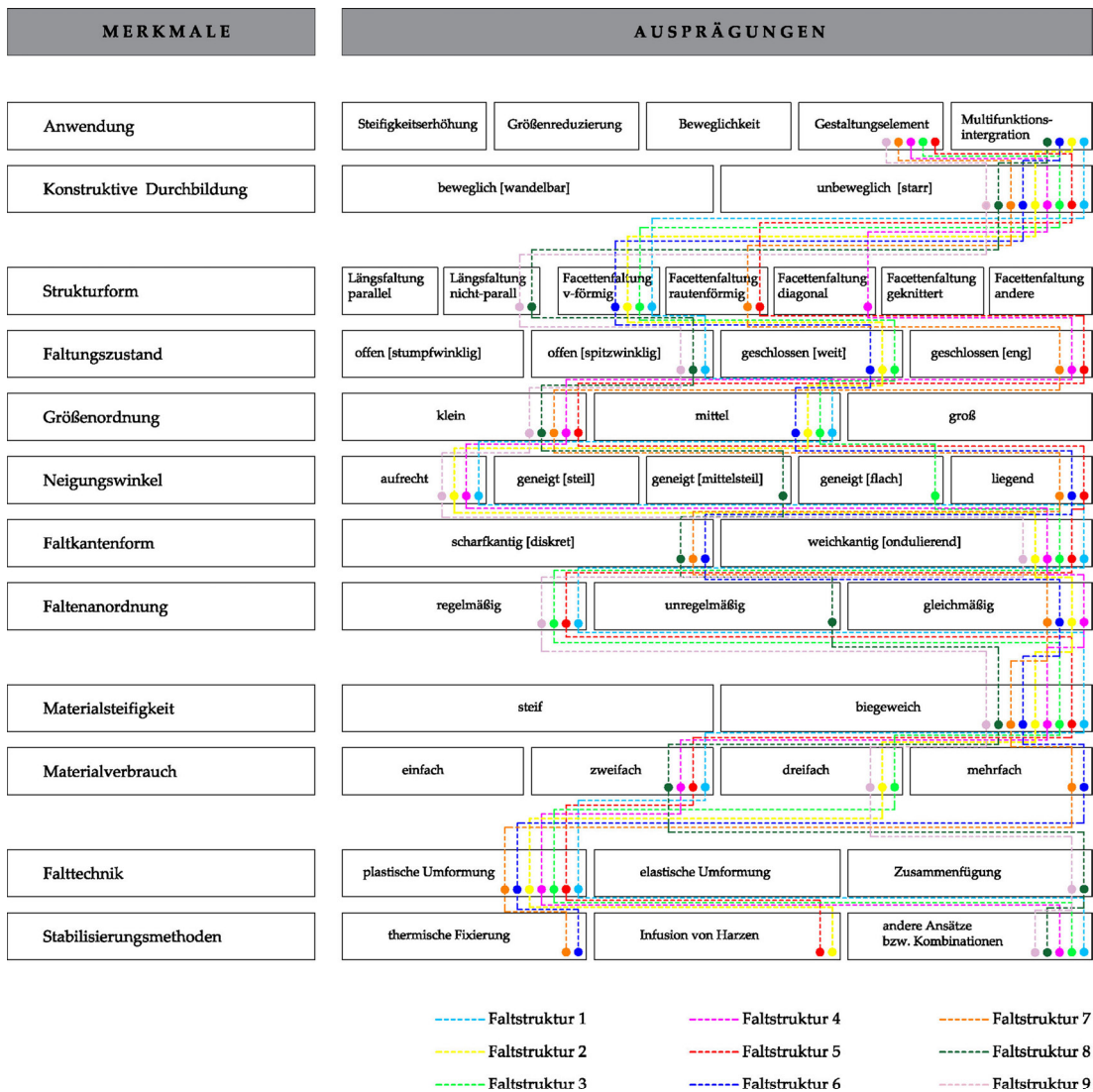


Abbildung 4.1 Einordnung der untersuchten Faltstrukturen im Morphologischen Kasten

#### 4.2.1 Facettenfaltung mittels Raffung

Im Bereich der Bekleidungsindustrie wird Raffung angewendet, um das Erscheinungsbild bzw. das Volumen eines Stückes Stoff mit wenigen Nadelstichen zu verändern. Einzelne, sich auf einem größeren Textil befindende Punkte werden so zusammengeführt, dass sich durch den materialspezifischen Selbstbildungsprozess ein bestimmter Faltenwurf einstellt. Diese Technik wird als „smoken“ bezeichnet [[95] Singer 2014].

Punktuell geraffte Faltstrukturen sind für textile Gebäudehüllen aus drei Gründen besonders interessant: Erstens stabilisiert die Verformung das Material. Zweitens generiert die Raffung kurvenförmige Faltungen mit weichen Faltekanten, die beim Faltprozess keine mechanischen Beschädigungen der Oberflächenbeschichtung hervorrufen. Drittens lassen sich punktuell geraffte Faltstrukturen leicht mit den typischen materialspezifischen Verbindungstechniken wie z.B. Nähen erzeugen.

Basis für die Entwicklung eines solchen Faltsystems ist der Einsatz eines orthogonalen Rasters, das es erlaubt, komplexe geometrische Verformungsfiguren zu entwickeln. Die notwendigen, bewussten Manipulationen an der Materialoberfläche lassen sich durch die entsprechenden materialspezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Textilien und deren Beschichtungen vornehmen. So können bspw. durch einfache Raffungen, d.h. durch die Zusammenführung zweier definierter Raffpunkte, konvexe und konkave Wölbungen im Material erzeugt werden. Die Wölbungen resultieren dabei aus Verdrängungen im Material und stehen in Abhängigkeit zum Volumen, das zusammengerafft wird. Damit sich eine lokale Raffkomponente ausbilden kann, müssen vorgegebene Abstände zwischen den Raffpunkten eingehalten werden.

Die Wechselbeziehung zwischen den Parametern der Raffpunkte und den daraus resultierenden Verformungsfiguren wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mithilfe mehrerer Prototypen – den Faltstrukturen 1 bis 5, analysiert. Diese Faltstrukturen wurden aufgrund ihrer ästhetischen Erscheinung und der vielfältigen Möglichkeiten zur bauphysikalischen Aktivierung ihrer Rückseite gewählt. Die Rückseite kann befüllt bzw. mit verschiedensten Materialien beschwert werden, um so gezielt auf bauphysikalische Parameter zu reagieren. Die fünf ausgewählten Faltstrukturen können anhand der unterschiedlichen Befüllungsgrade ihrer Rückseiten in drei Klassen eingeteilt werden, die für einen hohen Befüllungsgrad (100-66,7% der Oberfläche kann befüllt werden), mittleren Befüllungsgrad (66,6-33,4%) und geringen Befüllungsgrad (33,3-0%) stehen. Faltstrukturen 1 und 2 weisen einen hohen Befüllungsgrad an ihrer Rückseite auf. Faltstrukturen 3 und 4 liegen im mittleren Bereich. Bei Faltstruktur 5 ist der Befüllungsgrad nur sehr gering.

Der Faltungsprozess bei gerafften Strukturen beginnt mit der Eintragung der genauen Positionen der Raffungspunkte auf einem vorbestimmten Raster. Die projizierten Raffpunkte sind die einzige Information, die für die nachfolgende Manipulation der Flächen benötigt wird. Daher konnten auf dieser Basis typengebundene Raffungsschemata für die Manipulation größerer Teststücke ausgearbeitet werden: Bei Raffungen mit horizontaler, vertikaler und diagonaler Laufrichtung variieren die Abstände zueinander, sodass sich verschiedene Verformungsfiguren ausbilden. Der Raffungsprozess erfolgte in der Arbeit manuell, wäre aber grundsätzlich auch maschinell durchführbar gewesen. So entstanden geraffte Facettenfaltungen mit verschieden ausgeprägten Strukturgeometrien und Eigenschaften.

**Faltstruktur 1** – Facettenfaltung mit rautenförmiger Strukturierung – zeichnet sich durch einen hohen Befüllungsgrad der Oberfläche aus, die an der Rückseite fast vollflächig (zu 98 %) befüllt werden kann. Die Faltstrukturgeometrie basiert auf einem quadratischen Raster (5x5 cm), auf dem die Raffpunktpaare in regelmäßig versetzten Abständen eingetragen sind. Der Abstand zwischen zwei Raffpunkten

beträgt in horizontaler Richtung 10 cm und in vertikaler Richtung 5 cm. Die waagrecht verlaufende Raffung wird immer zur Mitte hin zusammengeführt. Die Faltpatrone (Abb. 4.2) zeigt die markierten Raffpunkte, an welchen das Gewebe punktuell gehalten wird. Die roten Doppelpfeile zeigen die Richtung, in welche der Faden gezogen wird. Faltstruktur 1 wurde zunächst aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe (PVC/PES-Gewebe) Typ 3 erzeugt, indem zuerst eine sekundäre Stehfaltung (Ziehharmonikafaltung) anhand des Rasters ausgebildet wurde (Abb. 4.3). Im zweiten Schritt wurden die Raffpunktepaare an den Bergfalten straff zusammengezogen und mit mehreren Steppstichen punktuell vernäht. Nach dem Auffalten der Oberfläche entsteht so an der Vorderseite eine facettierte Faltstruktur mit relativ weichen Faltkanten. Die Raffstruktur ist jedoch nicht starr und kann sich je nach Öffnungswinkel der Faltungen stark verändern. Die Rückseite bildet ein homogenes Muster aus gleichseitigen Dreieckstaschen, an deren Knotenpunkten sich immer vier Faltkanten schneiden. Die Faltengeometrie wirkt dadurch sehr stabil und lässt sich leicht befüllen.

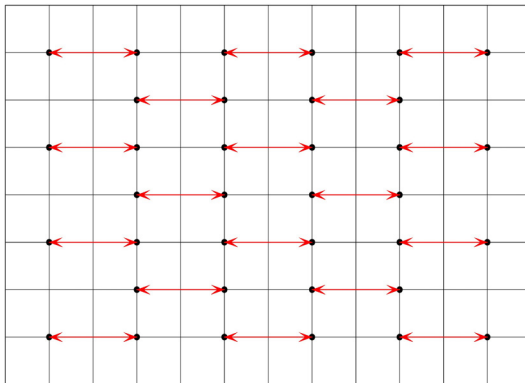


Abbildung 4.2 Faltpatrone der Faltstruktur 1

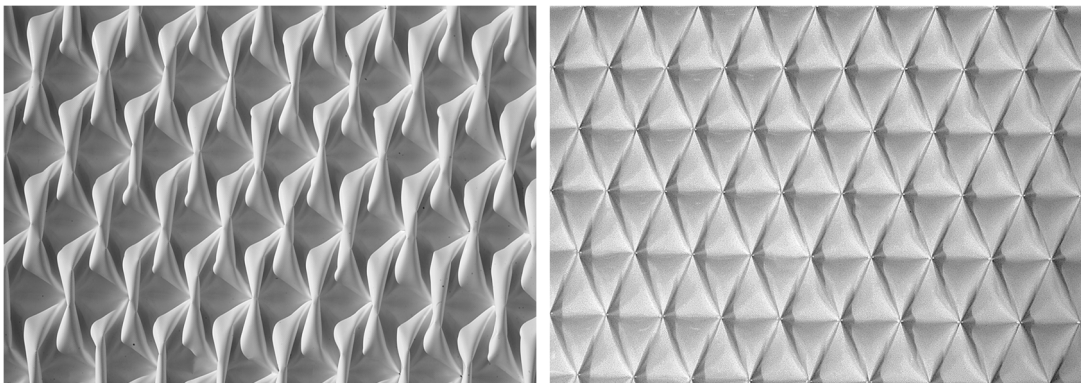
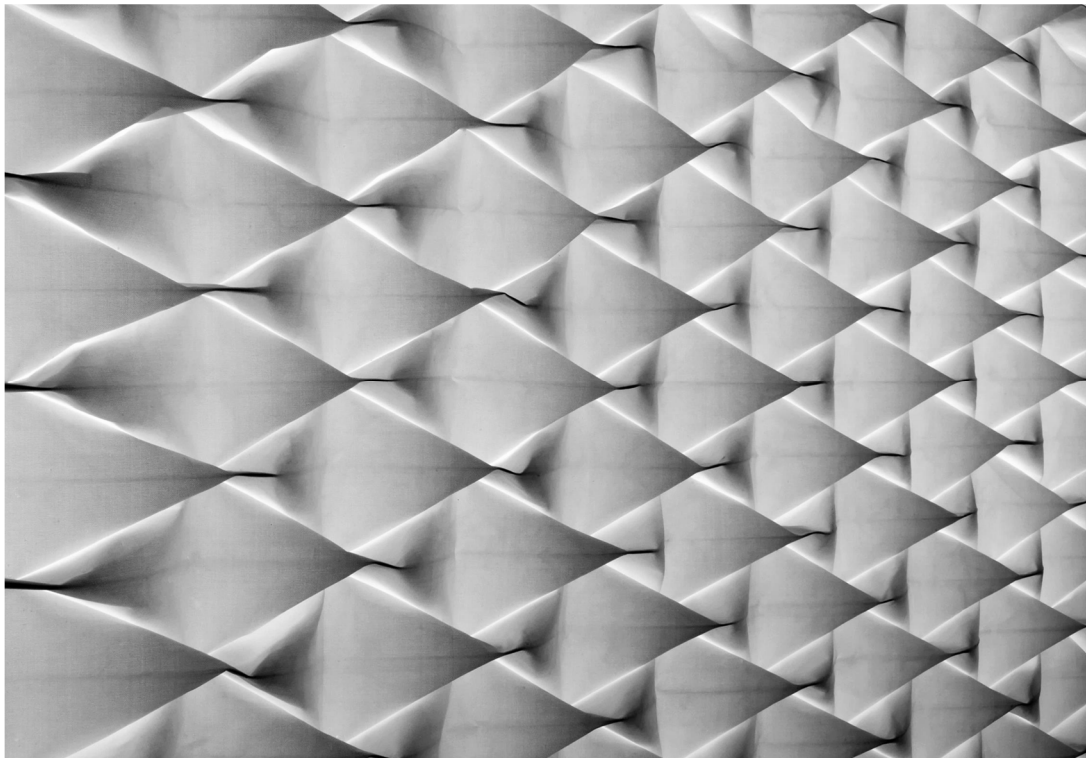


Abbildung 4.3 Faltstruktur 1, PVC/PES-Gewebe, Vorderseite (rechts), Rückseite (links)

Bei der Erzeugung von Faltstruktur 1 stand die Verwendung einfacher Faltmethoden im Vordergrund. Ausgehend von der einfachsten, aufrechten Längsfaltung und der punktuellen Verbindung der Faltkanten wurden verschiedene Faltstrukturen erzeugt, die in Abhängigkeit von der Position der Raffpunkte, der Größe der Auffaltflächen, der Zugrichtung der Raffung und den spezifischen Eigenschaften

des verwendeten Materials variiert werden konnten. In Zusammenhang mit Letzterem wurde Faltstruktur 1 zusätzlich auch auf unbeschichtetes PTFE-Gewebe übertragen und erzeugt hier einen völlig anderen Faltenwurf als es bei PVC/PES-Gewebe der Fall ist (Abb. 4.4). Dies kommt dadurch zustande, dass das unbeschichtete PTFE-Gewebe viel weicher und flexibler ist als das beschichtete PVC/PES-Gewebe. Die Faltkanten lassen sich daher schärfer pressen, woraus eine andere Formgebung der Faltstruktur resultiert.



**Abbildung 4.4** Faltstruktur 1, unbeschichtetes PTFE-Gewebe (Foto: ILEK\Gabriela Metzger)

Die nachfolgenden Faltstrukturen basieren auf Verformungsfiguren, die durch eine diagonale Anordnung der Raffpunkte generiert werden. Dabei spielt die horizontale und vertikale Versetzung der Raffrapporte eine wichtige Rolle. Die zweifachen und dreifachen Raffpunkte erzeugen unterschiedliche Faltbilder, die hinsichtlich der Zugrichtung der Raffung und der Abstandsgröße zueinander variieren. Die gerafften Faltstrukturen wurden zunächst mit Polyestergewebe realisiert und untersucht. Anschließend wurden die Faltproben auf PVC/PES, Typ II übertragen.

**Faltstruktur 2** – Facettenfaltung mit pfeilförmiger Strukturierung – bildet an der Rückseite dreieckige Falttaschen, die sich einfach befüllen lassen und somit sehr gut für bauphysikalische Maßnahmen eingesetzt werden können. Der Befüllungsgrad liegt bei ca. 75%. Die Faltstruktur gründet, wie die anderen gerafften Faltstrukturen, auf einem quadratischen Raster. Den Ausgangspunkt für die Faltung bilden V-artige Raffrapporte, die über die Diagonale eines Rasterfeldes zu einem Knotenpunkt straffgezogen und fixiert werden. Die in der vertikalen Richtung ver-

laufenden Raffreihen werden um ein Rasterfeld zueinander nach unten versetzt (Abb. 4.5). Bei der Übertragung der Faltengeometrie auf das Textil entstehen auf der Vorderseite des Faltmusters dreidimensionale Strukturen, die geometrisch einem Pfeil ähneln (Abb. 4.6). Zudem weist die Oberfläche eine tiefe Strukturierung auf, die entsprechend der Rastergröße variieren kann. Daher lässt sich im Hinblick auf die Schalldämmung eine diffus streuende Wirkung der Schallwellen an der Oberfläche in bestimmten Frequenzbereichen abhängig von der Größe der Faltstrukturen vermuten. Neben den funktionalen Aspekten zeichnet sich Faltstruktur 2 durch interessante ästhetische Wahrnehmungseffekte aus, die durch Licht- und Schattenspiele ergänzt werden (Abb. 4.7).

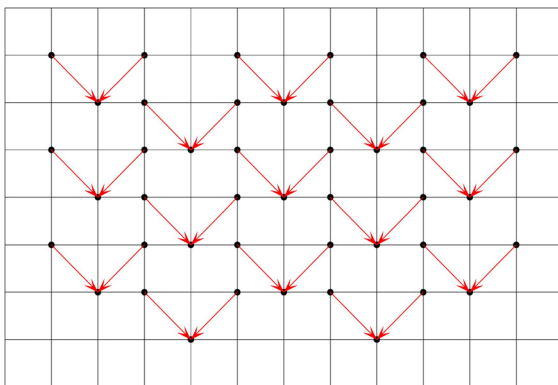


Abbildung 4.5 Faltpatrone der Faltstruktur 2

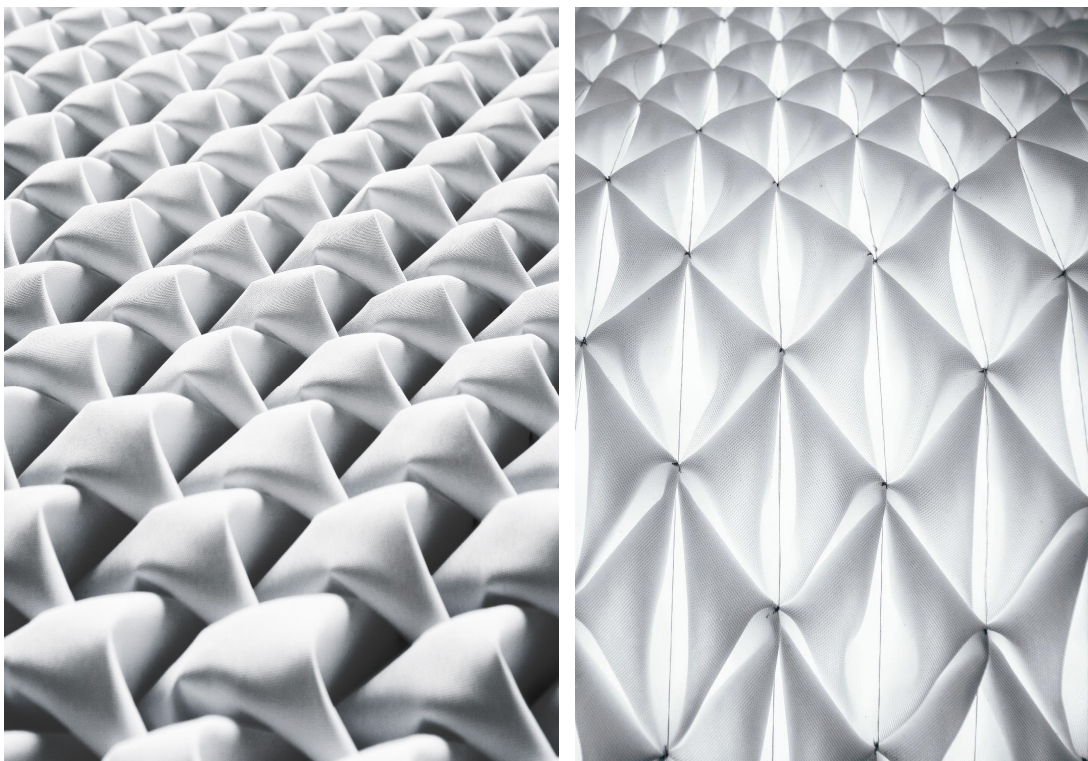
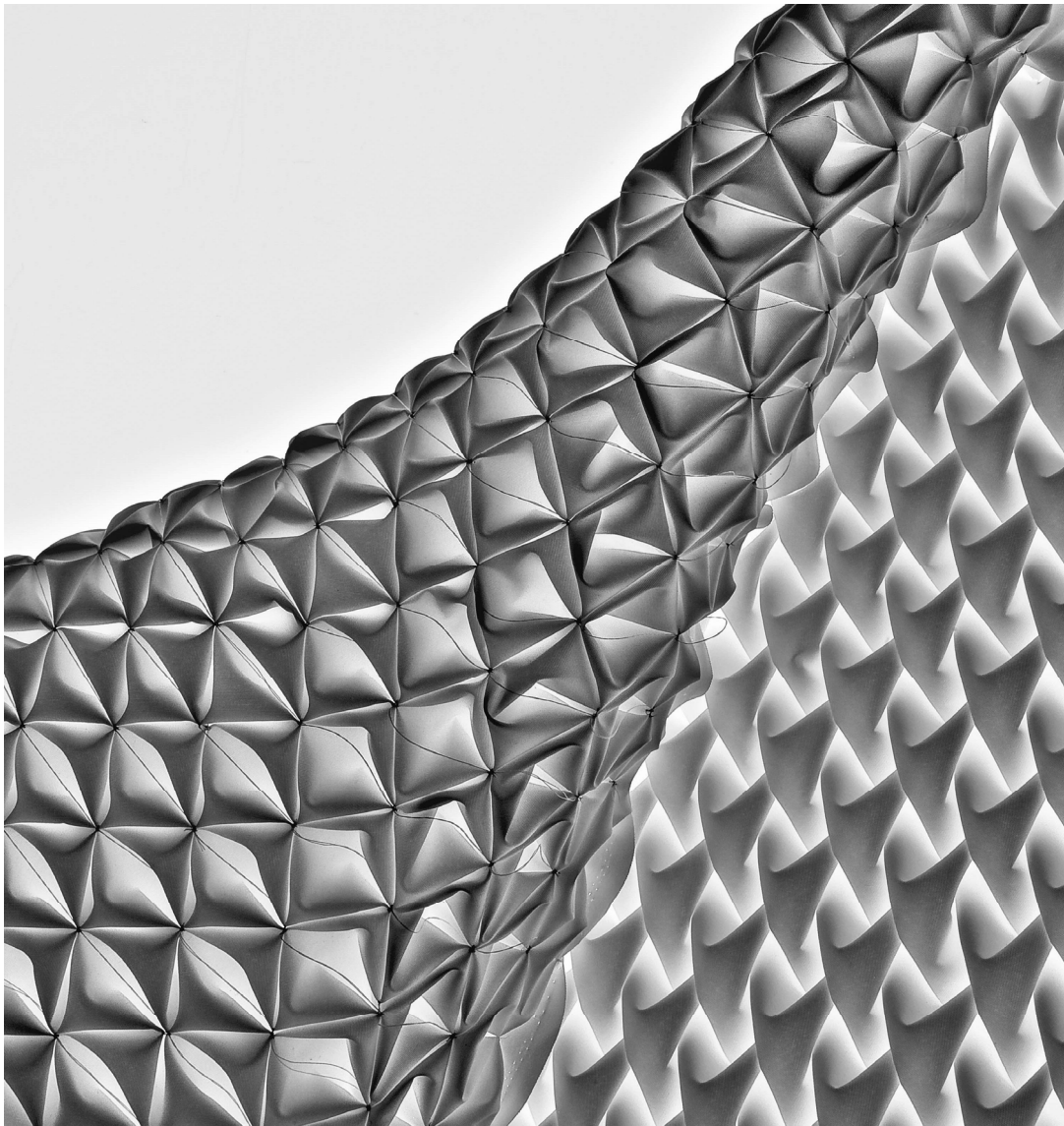


Abbildung 4.6 Faltstruktur 2 aus PTFE-Gewebe, Vorderseite (rechts), Rückseite (links)



**Abbildung 4.7** Faltstruktur 2. Vorderseite mit pfeilartigen Strukturen, Rückseite mit punktuellen Raffungen durch Polyestergera mit Steppstichen festgehalten. Material: Fluorpolymer-beschichtetes Gewebe aus ePTFE-Faser, (Foto: ILEK/Gabriela Metzger).

**Faltstruktur 3** – Facettenfaltung mit dreieckförmigen Faltstrukturen – lässt zwar nur mittlere Befüllungsgrade zu (45-40% der Oberfläche). Doch Aufgrund der linearen Anordnung der ineinander verflochtenen Faltkammern lassen sich unterschiedliche Funktionsmaterialien miteinander kombinieren, was aus bauphysikalischer Sicht wiederum von Nutzen ist. Die Faltgeometrie gründet auf einem vorgegebenen Raster mit folgenden Raffrapporten (Abb. 4.8): Über die Diagonale eines Rasterfeldes werden zwei Raffpunkte gebildet und symmetrisch gespiegelt. Zugleich werden die Raffpunkte um ein Rasterfeld vertikal nach unten versetzt. Zwischen den Raffreihen wird ein Abstand von einem Rasterfeld behalten. Die definierten Raffpunkte werden in der vorgegebenen Zugrichtung präzise zusammengeführt und mit mehreren Steppstichen punktuell vernäht, ohne den Nähgarn dabei durchzutrennen. So entsteht eine Raffkombination mit diagonal ineinander ver-

flochtenen, V-förmigen Faltstrukturen, deren Spitzen sich teilweise überdecken und ein geordnetes Erscheinungsbild von vertikal verflochtenen Zweierreihen hervorrufen (Abb. 4.9).

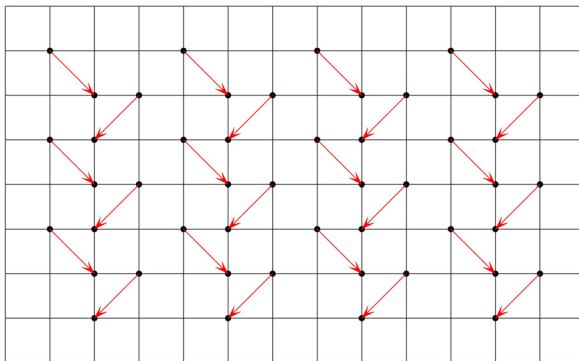


Abbildung 4.8 Faltpatrone der Faltstruktur 3



Abbildung 4.9 Faltstruktur 3 in Polyester

**Faltstruktur 4** – Facettenfaltung mit geflechtsartiger Faltstruktur – erzeugt ähnlich der vorherigen Faltstruktur 3 eine Art Oberflächengeflecht, das die Optik der Leinwandbindung, der einfachsten Bindungsart bei Geweben, widerspiegelt. Die Oberfläche an der Rückseite der Faltstruktur lässt nur mittlere Befüllungsgrade von 35-40% zu. Wie bei Faltstruktur 3 besteht hier die Möglichkeit, unterschiedliche Funktionsmaterialien miteinander zu kombinieren und/oder die Faltkammern nur punktuell zu befüllen. Faltsystem und -methode entsprechen hier exakt denjenigen bei Faltstruktur 3. Jedoch wird der Abstand um ein Rasterfeld zwischen den diagonal angeordneten Raffpunktpaaren vergrößert. Durch die regelmäßige, dem Konstruktionsraster folgende Anordnung der Raffpunkte ergibt sich eine homogene Flächenartikulation aus diagonal verlaufenden, rechteckigen Strukturelementen (Abb. 4.10). Diese Faltstruktur wurde aus feinem Polyesterstoff realisiert (Abb. 4.11).

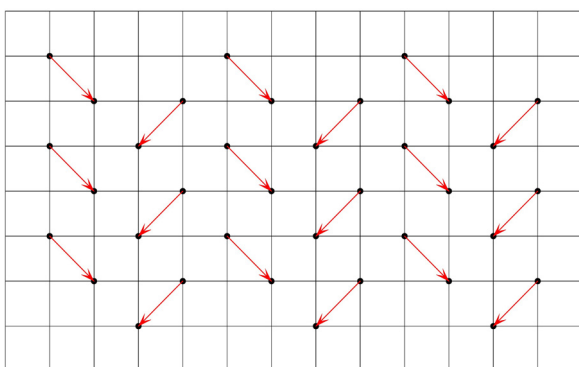


Abbildung 4.10 Faltpatrone der Faltstruktur 4

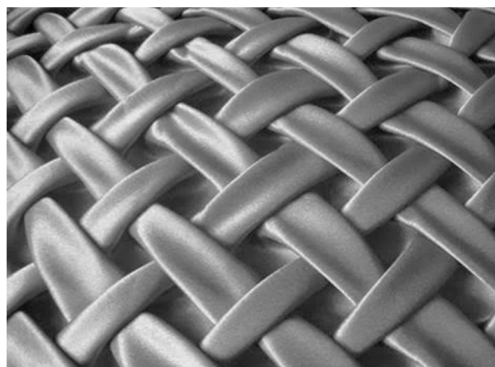


Abbildung 4.11 Faltstruktur 4 in Polyester

**Faltstruktur 5** – Facettenfaltung mit rautenförmiger Faltstruktur – präsentiert eine Möglichkeit zur punktuellen Oberflächenbefüllung mit geringen Befüllungsgraden, welche bei 10-13% liegen. Die gefaltete Rautenstruktur lässt sich aufgrund der Überlappung und Verdrehung des Stoffes nur bedingt befüllen oder beschweren.

Ihre Faltgeometrie basiert wie bei allen andern gerafften Faltstrukturen auf einem vorab definierten Raster. Im Gegensatz zu Faltstruktur 1 wird Faltstruktur 5 in senkrechter Richtung gerafft. Die Raffpunkte werden beidseitig und abwechselnd punktuell verknüpft. Die blauen Doppelpfeile markieren in der Faltpatrone (Abb. 4.12) die Raffpunkte an der Vorderseite des Stoffes, die roten Doppelpfeile die Raffpunkte an der Rückseite. Es entsteht eine liegende Faltstruktur mit einem regelmäßigen Rautenmuster, die ausschließlich aus der gezielten Überlappung des Stoffes resultiert. Je nach Transparenz des Stoffs kommen die gestalteten Oberflächenelemente mehr oder weniger zum Vorschein und können die Blickdurchlässigkeit des Stoffes je nach Bedarf entsprechend beeinflussen. Die sich wiederholende, rautenförmige Faltstruktur setzt sich durch den Kontrast deutlich vom Hintergrund ab und erzeugt so eine räumliche Tiefe.

Die Übertragungsversuche von Faltstruktur 5 auf herkömmliche Bautextilien (PVC/PES-, PTFE-Gewebe) ergaben keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da der Kontrast zwischen der rautenförmigen Faltstruktur und dem Hintergrund zu gering ausfiel (auch beim Material Tenara Fabric 4T40HF mit einer Lichttransmission von 38%). Faltstruktur 5 kommt am besten zur Geltung bei sehr lichtdurchlässigen Stoffen wie zum Beispiel Seidenorganza (Abb. 4.13). Damit der Stoff seine modellierte Textur behält, kann die Faltung durch Infusion von Epoxidharzen dauerhaft stabilisiert werden.

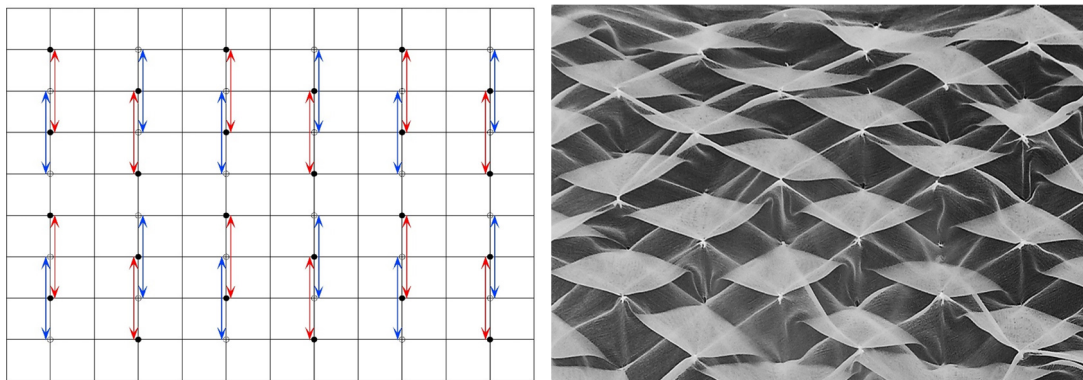


Abbildung 4.12 Faltpatrone der Faltstruktur 5    Abbildung 4.13 Faltstruktur 5 in Seidenorganza

#### 4.2.2 Facettenfaltung mittels Tessellations

Ausgehend vom Studium der traditionellen Origamikunst wurden im Rahmen der Gestaltungsstudien auch Übertragungsversuche von origamiartigen Faltungen auf Textilien vorgenommen. Das hier zugrundeliegende Prinzip der klassischen Origamikunst basiert auf der Formgenerierung ohne Zuhilfenahme von Schneiden, Kleben und Addition zusätzlicher Strukturelemente. Vor allem die Verwendung von *Origami Tessellations* führte zu interessanten Faltkompositionen, die immer von einem und dem gleichen, einfachen Grundelement ausgehen. Bei der Tessellations

werden komplexe Geometrien bzw. Polygone in einfache Flächen wie z.B. Dreiecke oder Vierecke zerlegt. Durch die Repetition des gleichen Grundelementes entstehen mosaikartige Oberflächenstrukturen, welche sich sehr gut auf Textilien applizieren lassen. Beim Faltprozess werden die Faltkanten in Abhängigkeit vom Material entweder scharfkantig geknickt und gepresst, oder mit lokaler Hitzeeinwirkung herbeigeführt. Charakteristisch für diese Faltstrukturen sind zudem differenzierte Materialüberlappungen, die an den Oberflächen ein Spektrum von Transluzenzgraden bieten.

Im Rahmen der Übertragungsversuche von origamiartigen Faltungen auf Textilien wurden zwei Faltstrukturen gewählt, bei welchen sich Funktionselemente besonders gut in die Faltung applizieren lassen. Anders als bei gerafften Faltstrukturen kann man in Faltstrukturen mittels Tessellations keine granulatartigen Materialien anbringen, weil dies aufgrund der relativ flachen Oberflächenstrukturierung eine geometrische Deformierung insbesondere der scharfkantigen Falttaschen hervorrufen würde. Die Falttaschen der Faltstrukturen 6 und 7 können an ihren Rückseiten mit geometrisch vordefinierten Elementen belegt und beschwert werden. Die Belegung der Flächen ist bei beiden Faltstrukturen in jeglichem Ausmaß je nach den gegebenen Anforderungen möglich.

**Faltstruktur 6** gründet auf einem  $60^\circ$ -Gitterraster, das durch eine gleichmäßige, senkrechte Unterteilung ergänzt wird. Die gesamte Gitterteilung ist auf der Faltpatrone in Form einer gestrichelten Linie abgebildet und generiert die konvexen Faltkanten bzw. Talfalten (Abb. 4.14). Die konkaven Faltkanten bzw. Bergfalten der Faltstruktur werden in Form eines gleichschenkligen Dreiecks dargestellt. Die Erzeugung dieser Faltgeometrie erfordert eine gewisse Grundsteifigkeit des verwendeten Materials. Daher wurde für die Faltprobe ein Gittergewebe aus Polyester (Maschenweite  $1,0 \times 0,5$  mm) verwendet. Die scharfgekanteten Falten der Struktur wurden zuerst durch händisches Knicken geformt und anschließend durch thermische Behandlung fixiert. Es besteht die Möglichkeit, an der Rückseite die Knotenpunkte der Faltkanten miteinander zu verbinden, sodass die Falten auch bei größeren Oberflächenformaten unter ihrem Materialeigengewicht nicht aufgehen, sondern ihre Form beibehalten. Die Faltung besteht prinzipiell aus repetitiven, dreieckigen Strukturen, die sich teilweise überdecken und dabei eine schuppenartige Oberfläche generieren. Aufgrund der Materialüberlappung entstehen unterschiedliche Transparenzgrade an der Oberfläche. Die dadurch hervorgerufenen Farb- und Formkontraste lassen die Faltstruktur wirksamer erscheinen. Die schuppenartige Oberflächenbeschaffenheit erzeugt einen taktilen Wahrnehmungseffekt, der greifbar zu erleben ist (Abb. 4.15, 4.16, 4.17).

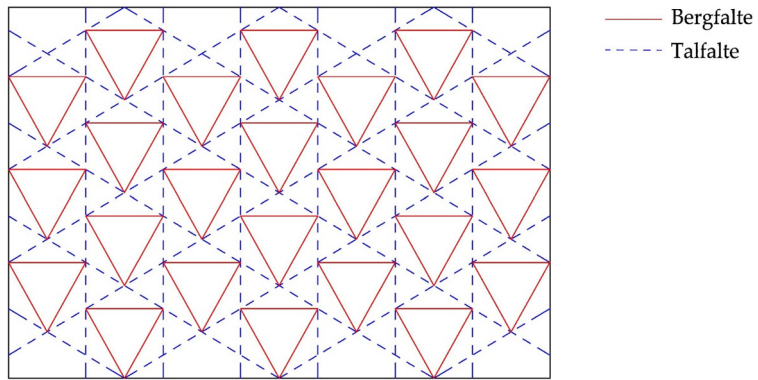


Abbildung 4.14 Faltpatrone der Faltstruktur 6

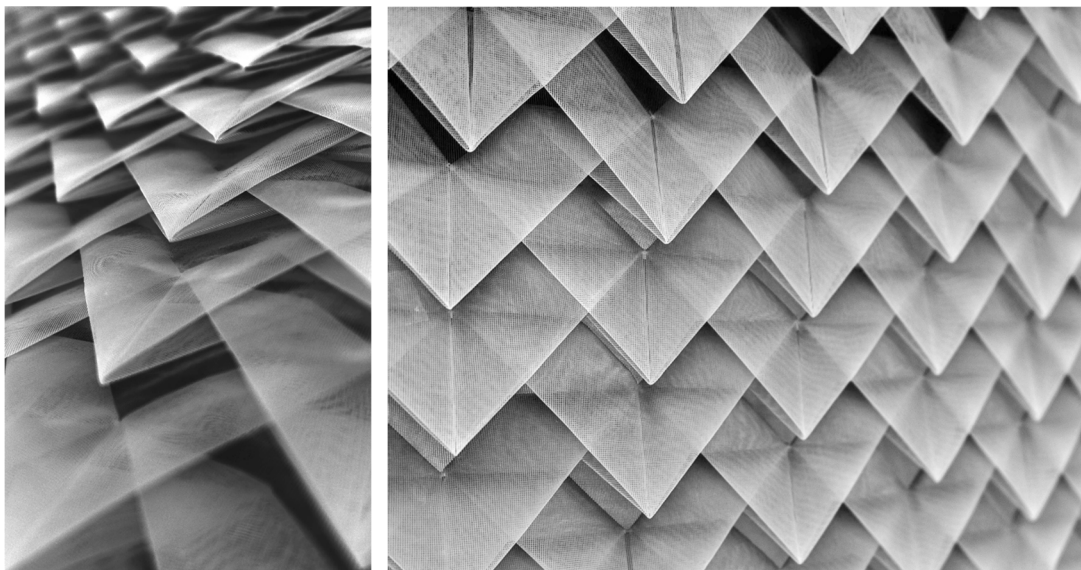


Abbildung 4.15 Faltstruktur 6 aus Polyester-Gittergewebe

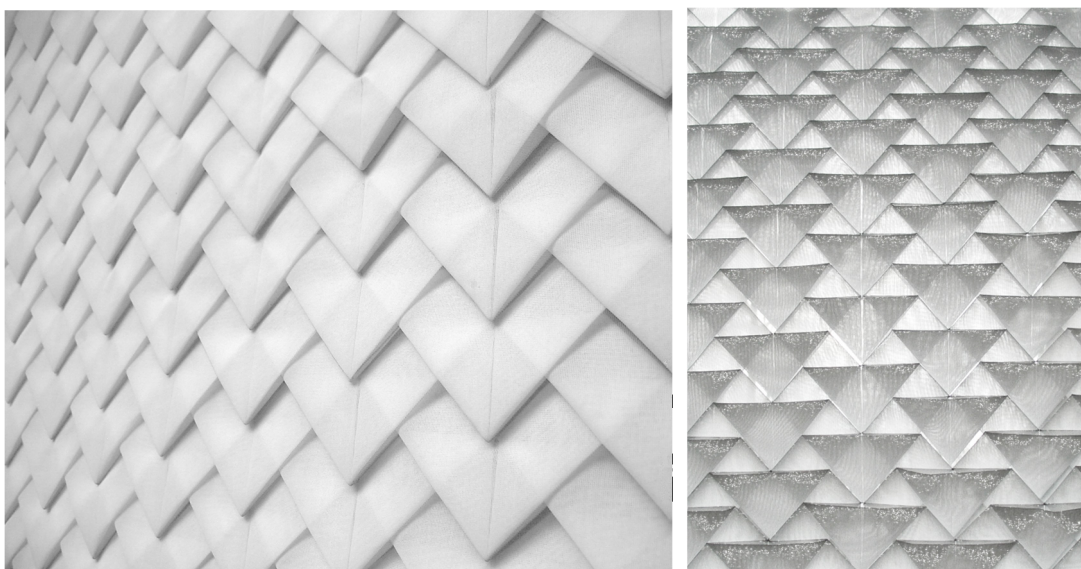


Abbildung 4.16 Faltstruktur 6 aus unbeschichtetem PTFE-Gewebe, Vorderseite (links), Rückseite (rechts)

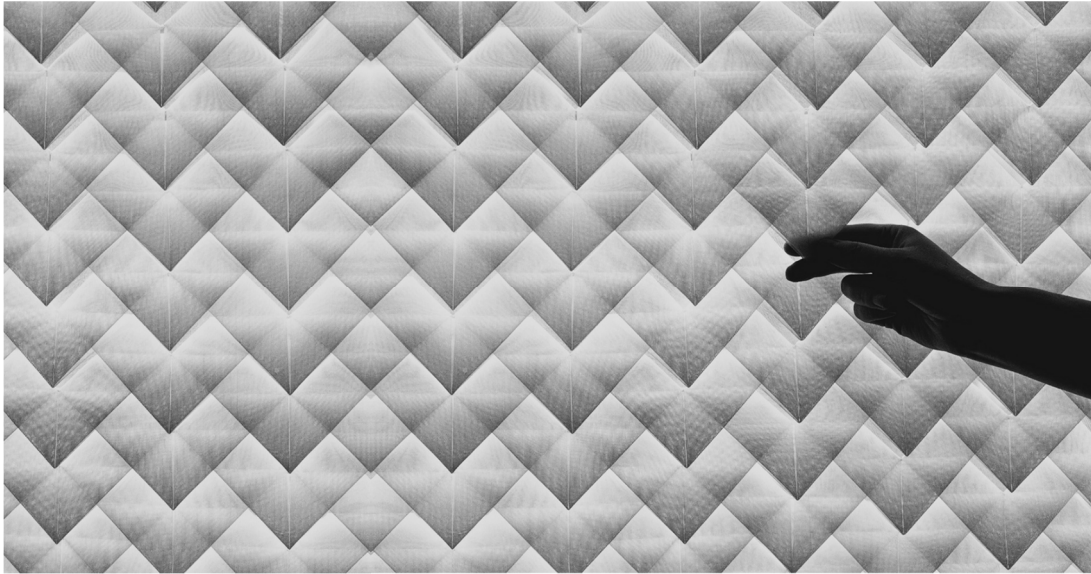


Abbildung 4.17 Faltstruktur 6, fotografiert im Gegenlicht

**Faltstruktur 7** liegt ähnlich wie Faltstruktur 6 auf einem  $60^\circ$ -Gitterraster mit senkrechten Unterteilungen, welche die Schnittpunkte des Rasters genau treffen. Diese Geometrie führt zu konvexen Faltkanten (Talfalten), die durch dreieckige konkave Faltkanten (Bergfalten) ergänzt werden (Abb. 4.18). Die Dreiecke sind diesmal eng beieinander angeordnet, sodass sich ihre Kanten berühren und die Flächen teilweise ineinander verflochten sind. Die Vorderseite der Faltstruktur ergibt ein Bild aus gleichschenkligen Dreiecken, die an ihren Ecken miteinander verbunden und zu einem Sechseck angeordnet sind (Abb. 4.19, links). Die Repetition der Dreiecke und ihre geometrische Anordnung führen an der Rückseite wiederum zu einem in sich geschlossenen Geflecht aus Sechsecken (Abb. 4.19, rechts). Aufgrund der relativ biegesteifen Beschichtung wurde die Faltprobe aus Fluorpolymer-beschichtetem PTFE-Gewebe hergestellt. Die scharfen Faltkanten wurden sukzessiv während des Faltprozesses durch lokale Hitzeeinwirkung stabilisiert. Um das Aufgehen der Faltung zu verhindern, könnten, falls zusätzlich erforderlich, weitere Verbindungselemente an den Knotenpunkten, an den sich jeweils sechs Dreiecke treffen, angebracht werden. Insgesamt zeichnet sich Faltstruktur 7 durch eine eng geschlossene und liegende Struktur aus, deren Erscheinung an der Vorderseite durch die Repetition von gleichen Dreiecken und an der Rückseite durch die Repetition von gleichen Sechsecken bestimmt wird.

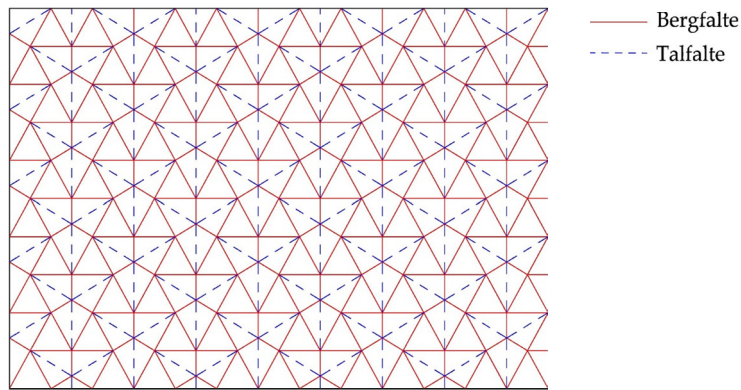


Abbildung 4.18 Faltpatrone der Faltstruktur 7

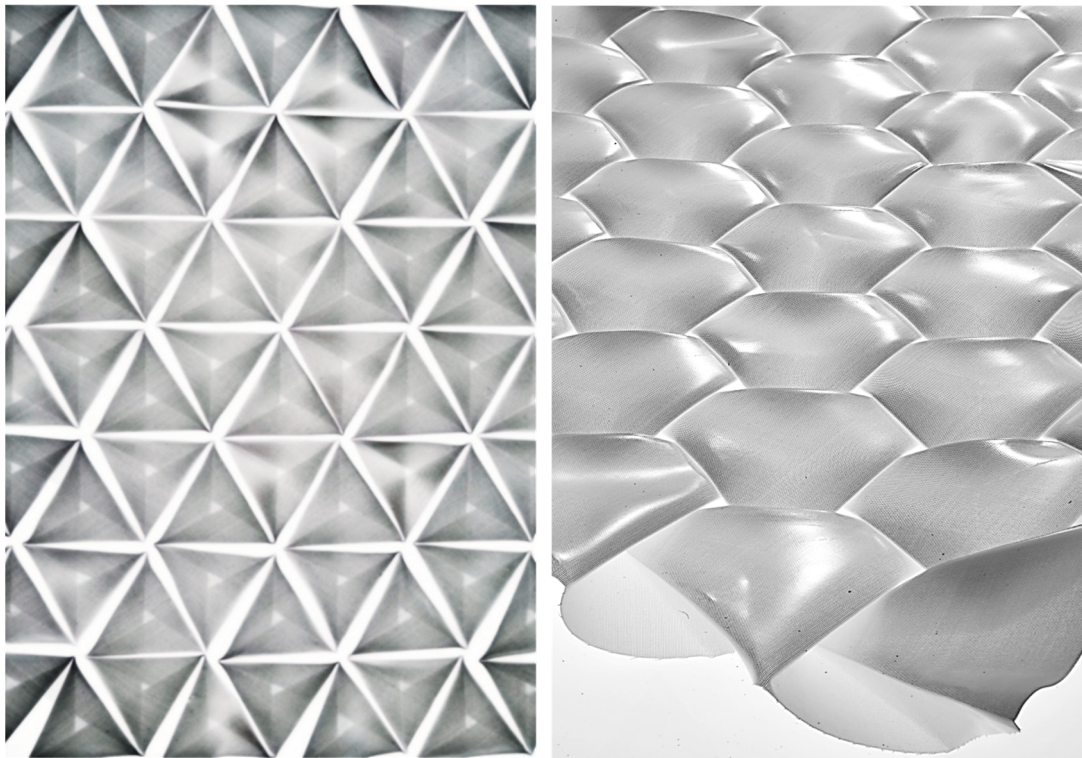


Abbildung 4.19 Faltstruktur 7 aus beschichtetem PTFE-Gewebe, Vorderseite (links), Rückseite (rechts)

#### 4.2.3 Längsfaltung mittels Trennen, Verformen und Zusammenfügen des Materials

Während Faltstrukturen 1 bis 7 auf der plastischen Umformung basieren, liegt den beiden folgenden Gestaltungsstudien das (Trennen, Verformen und) Zusammenfügen des Materials als Faltechnik zugrunde. Diese Technik erlaubt Möglichkeiten zur Oberflächengestaltung, die bisher nur selten in Verbindung mit textilen Stoffen gebracht wurden. Faltenkonstruktionen mittels Zusammenfügung zeichnen sich durch eine einfache Formensprache aus und gehen meist von der Strukturform der Längsfaltung aus. Die Flächensegmente werden entsprechend den gesetzten Anforderungen transformiert und mithilfe einer geeigneten Verbindungsmethode zu einem Gesamtgebilde zusammengefügt. Die beiden im Folgenden untersuchten

Faltstrukturen 8 und 9 sind durch die Textilarbeiten von Anne Kyrö Quinn inspiriert und in einer vereinfachten Form auf Bautextilien übertragen.

Es wurden zwei Faltstrukturen gewählt, die sich im Hinblick auf die Ausbildung der Faltkantenform zwischen scharfkantigen Faltkanten (Faltstruktur 8) und weichkantigen Faltkanten (Faltstruktur 9) unterschieden. Dabei war die jeweils einfache und schlichte geometrische Form der Faltstruktur maßgeblich. Eine solche Form lässt in Zusammenspiel mit vorteilhaften materialspezifischen Werkstoffeigenschaften eine einfache Herstellung und Fertigung von Faltstrukturen zu. Faltstrukturen 8 und 9 wurden zudem gewählt, weil sie nicht vordergründig den schmückenden Charakter der Faltung vermitteln. Denn zu komplexe Faltstrukturen aus den Zuschnitt-Streifen würden dekorativ wie aufgebraute Applikationen an der Oberfläche (Textilaufnäher) wirken.

**Faltstruktur 8** präsentiert eine arrangierte Faltenkomposition aus verdrehten Zuschnitt-Streifen. Die scharfkantige Oberflächenstrukturierung deutet auf eine verstärkte Reflexion der Schallwellen und somit auf eine Verbesserung der Schalldämmeigenschaften hin. Die Faltstruktur lässt sich nicht direkt befüllen, kann aber an der Rückseite um eine vollflächige Funktionsschicht ergänzt werden. Für die Realisierung der Faltstruktur wurde PVC/PES-Gewebe, Typ III verwendet, da das Gewebe durch die PVC-Beschichtung eine gewisse Grundsteifigkeit des Materials aufweist. Das beschichtete Gewebe wurde auf eine Unterkonstruktion bespannt, worauf die einzelnen 5 cm breiten Streifen diagonal angeordnet wurden. Die losen Zuschnitt-Streifen wurden mit der vorgespannten Gewebelage mithilfe einer diagonalen Naht fixiert. Anschließend wurden die Streifen einmal umgedreht und am Rand der Unterkonstruktion befestigt, sodass die Verdrehung eine gleichmäßige Verformung erzeugte (Abb. 4.20). Der Grad der Verformung lässt sich je nach Stärke der aufgebrauten Zugspannung verändern. Je größer die Vorspannung, desto flacher wird die Struktur. Das Faltenbild wird symmetrisch über die diagonale Naht gespiegelt. Auf diesem Weg entsteht eine Faltstruktur, die durch einfache Verdrehung interessante Oberflächeneffekte generiert und zu veränderbaren Licht- und Schattensituationen führt (Abb. 4.21).

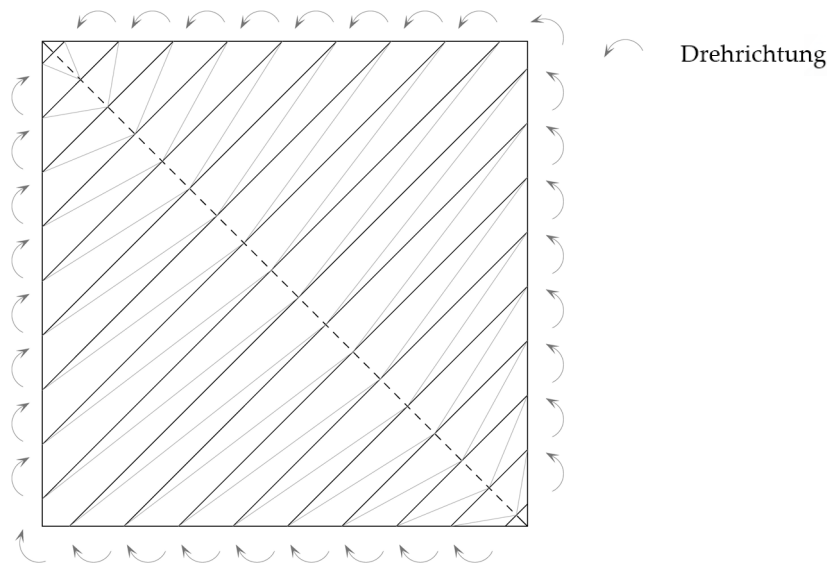


Abbildung 4.20 Faltpatrone der Faltstruktur 8

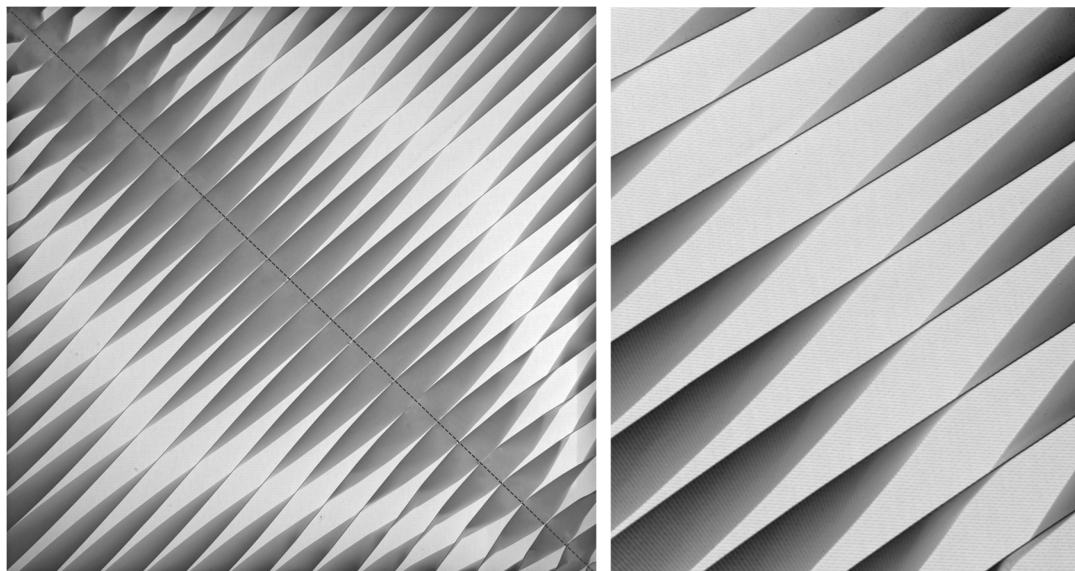


Abbildung 4.21 Faltstruktur 8 aus PVC/PES-Gewebe, Typ III (links), Detailausschnitt (rechts), (Bild: ILEK/Gabriela Metzger)

**Faltstruktur 9** zeichnet sich durch eine ondulierende (weichkantige) Oberflächenerscheinung aus. An den Stellen, an welchen die Zuschnitt-Streifen mit der Untergrundmembrane verbunden sind, können auch Funktionselemente angebracht werden und die Fläche zu 50% oder weniger punktuell beschweren. Die Umsetzung dieser Faltstruktur erfolgte mittels PVC/PES-Gewebe, Typ I. Dazu wurden auf eine lose Gewebelage 5 cm breite Zuschnitt-Streifen nach einem Schachbrettmuster aufgebracht und anschließend punktuell mit dieser verbunden (Abb.4.22). Die Streifen bilden so abwechselnd einen konkaven Halbkreis und einen Zwischenraum. Um interessante Lichteffekte an der Oberfläche zu generieren sind die Streifen immer um ein Rasterfeld versetzt. Die puristischen Applikationen zeigen, dass selbst einfachste Methoden, nämlich Zerschneiden, Verformen und

Zusammenfügen, ein sehr weites Spektrum an Gestaltungsmöglichkeiten bieten (Abb. 4.23).

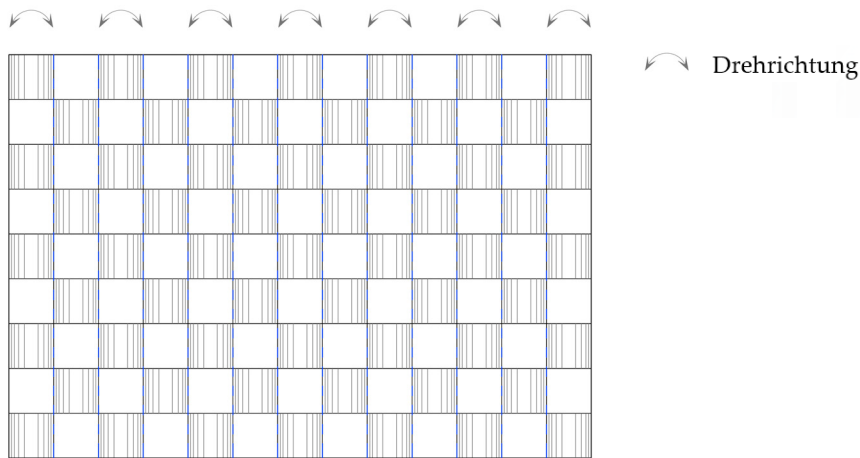


Abbildung 4.22 Faltpatrone der Faltstruktur 9



Abbildung 4.23 Faltstruktur 9 aus PVC/PES-Gewebe, Typ I (Bild: ILEK/Gabriela Metzger)

#### 4.2.4 Abschließende Bemerkungen zu den Gestaltungsstudien

Die Faltenvorziehung ist eine lang bewährte Methode zur materialgerechten Gestaltung textiler Oberflächen. Die hier präsentierten Faltstrukturen zeigen nur ein kleines Spektrum der möglichen Erscheinungsformen auf, die sich auf textile Werkstoffe und somit auf technische Gewebe und textile Gebäudehüllen übertragen lassen.

Im Hinblick auf den Herstellungsprozess der Faltung und ihre Applikation auf die textile Gebäudehülle lassen sich geraffte Facettenfaltungen und Längsfaltungen am einfachsten umsetzen. Bei der Erzeugung der Facettenfaltungen mittels Tessellation zeigte sich klar, dass die strenge Faltstrukturgeometrie dem verwendeten Material eine gewisse Grundsteifigkeit abverlangt, die aber u.a. durch eine entsprechende Beschichtung gewährleistet werden kann. Die Bildung von scharfkantigen Strukturen sowie ihre Stabilisierung durch eine thermische Behandlung können zur Beschädigung der Beschichtung und der Gewebefaser führen. Daher ist die Wahl der richtigen Materialien für die Faltenbildung von großer Relevanz.

Bei gerafften Facettenfaltungen wird das Material nur plastisch umgeformt und punktuell vernäht bzw. fixiert. Die weichen Faltkanten lassen dabei eine gewisse Flexibilität der Geometrie zu. Die Raffung stabilisiert die biegeweiche Oberfläche und bildet an der Rückseite meist dreidimensionale Strukturkammern, die sich mit geeigneten Funktionsmaterialien befüllen lassen. Diese Kombination funktionaler und ästhetischer Aspekte macht diese Faltungsart aus architektonischer Sicht äußerst interessant, denn nicht jede Faltstruktur lässt sich für technisch-funktionale Zwecke nutzen.

Die untersuchten Längsfaltungen entstanden mittels Zerschneiden, Verdrehen und Zusammenfügen des Materials. Diese Falttechnik verleiht der Oberfläche eine räumliche Tiefenwirkung, die spannungsvolle Lichtsituationen erscheinen lässt. Die Tiefenstrukturierung hat ebenso eine taktile Komponente, welche nur selten bei architektonisch gestalteten Flächen zur Geltung kommt. Insbesondere die untersuchten Längsfaltungen, aber auch die Gestaltungsstudien insgesamt, demonstrieren, dass mittels Faltenbildung das ästhetische Potenzial eines Textils entscheidend gesteigert werden kann, ohne dass es eines komplizierten Konstruktionsverfahrens bedarf. Die Faltenvorziehung kann der Oberfläche eine eigene materielle Präsenz verleihen – sie kann das Ausdruckpotenzial von Textilien in die Gebäudehülle übertragen, samt Integration funktionaler Elemente.

## 5 Schalldämmwirkung textiler Faltstrukturen

Aus bauphysikalischer Sicht weisen textile Konstruktionen gegenüber herkömmlichen, massiven Konstruktionen deutliche Defizite auf. Aufgrund der geringen flächenbezogenen Masse, der geringen Materialdicke und der hohen Biegeweichheit der Oberflächen haben textile Gebäudehüllen eine unzureichende schalldämmende Wirkung. Bisherige Ansätze, die schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen zu verbessern, basieren auf einer Erhöhung der Masse (z.B. durch Sandfüllung), auf zwei- oder mehrschaligen Aufbausystemen oder auf Multilayer-Aufbausystemen mit integrierten, schweren Mittellagen in den Schichtaufbauten. Zwar verbessern die genannten Lösungsansätze die Schalldämmwerte um mehrere Dezibel, tragen aber im Bereich der Lichtdurchlässigkeit zu immanenten Nachteilen bei. Dadurch schränken sie die architektonischen Qualitäten textiler Konstruktionen ein, da diese durch Lichtdurchlässigkeit und Leichtigkeit in starkem Maße geprägt werden.

Im vorliegenden Kapitel werden materialgerechte Systemlösungen, welche zur Verbesserung der schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen bei gleichzeitiger Erhaltung einer guten Lichttransmission beitragen, aufgezeigt und experimentell untersucht. Durch die Generierung von Faltstrukturen und anschließendem Befüllen der Strukturen mit ausgewählten Funktionsmaterialien bietet sich eine Möglichkeit, die Oberfläche schalltechnisch zu aktivieren. Die Verwendung unterschiedlicher Faltengeometrien – unter Berücksichtigung auftretender Einflussfaktoren in Bezug zur Wellenlänge des einfallenden Schalls – bewirkt zusätzlich eine gerichtete oder diffuse Reflexion der Oberfläche. Um zu überprüfen, inwiefern Systemlösungen mit befüllten Faltstrukturen zur Verbesserung der schalldämmenden Wirkung beitragen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Akustiklabor Messungen durchgeführt und ausgewertet. Diese bilden den Gegenstand des vorliegenden Kapitels. Die darauf aufbauenden Experimente zur Ermittlung der Lichttransmissionswerte der befüllten Faltstrukturen werden im nachfolgenden Kapitel 6 thematisiert.

### 5.1 Angewendete Grundlagen und Ansätze der Schalldämmung in den experimentellen Untersuchungen

Schall entsteht durch mechanische Schwingungen elastischer Medien, die sich als Schallwellen durch feste, flüssige und gasförmige Stoffe ausbreiten und von Menschen wahrgenommen werden. Die Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde bezeichnet man als Schwingungszahl oder Frequenz. Die Einheit der Frequenz ist eine Schwingung pro Sekunde, gleich 1 Hertz (Hz). Die Frequenz der

Schallwellen, die für das menschliche Ohr zu hören sind, liegt in einem Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 20.000 Hz. Um diesen großen Frequenzbereich zur Beurteilung von Schall und Lärm zu fassen, wird die Lautstärke bzw. Schallintensität mithilfe des Schallpegels definiert. Der Schallpegel ist das logartmische Maß der Schallwellen bezogen auf die Hörschwelle und wird in Dezibel (dB) gemessen. Eine Erhöhung um 3 dB bedeutet eine Verdopplung der Schallenergie und der Lautstärke. Ein Schallpegel, der über 85-90 dB liegt, wird vom Menschen als störend und unangenehm empfunden [[114] Fasold/Veres 2003].

Für die Transmission von Schallwellen durch Gebäudehüllen sind in der DIN-Norm 4109 (Schallschutz im Hochbau, Tabelle 8) Anforderungen an die Luftschalldämmung festgelegt, die nutzungsbedingt für die Außenhülle einzuhalten sind. Bei einem Lärmpegel im Außenbereich zwischen 55-80 dB darf der Schallpegel im Gebäudeinneren, der durch den ebengenannten Außenlärm verursacht wird, je nach Nutzungsart zwischen max. 30-50 dB liegen. Beim Durchgang des Lärms durch die Außenhülle des Gebäudes ist der Schallpegel damit um 25-30 dB zu senken [[115] DIN 4109 1997].

Die Luftschalldämmung von Bauteilen wird durch das Schalldämm-Maß  $R$  [dB] charakterisiert, das als logarithmisches Verhältnis der auf die eine Bauteilseite auftreffenden Schallenergie zur abgestrahlten Schallenergie auf der anderen Bauteilseite definiert ist [[116] Willems/Schild/ Stricker 2012].

$$R = 10 \lg \tau = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \quad [\text{dB}] \quad (5.1)$$

$R$	Schalldämm-Maß
$\tau$	Transmissionsgrad
$P_1$	auftreffende Schalleistung
$P_2$	abgestrahlte Schalleistung

Aus bauakustischer Sicht lassen sich grundsätzlich alle Wandkonstruktionen als einschalige oder mehrschalige Bauteile charakterisieren. Aus physikalischer Sicht spielen hier zahlreiche Aspekte eine Rolle. Im Folgenden werden jedoch nur diejenigen thematisiert, welche für die anschließenden Experimente unmittelbar relevant sind. Die Wirkungsweise von mehrschaligen Bauteilen lässt sich mithilfe derselben Prinzipien erklären, die (auch) für zweischalige Bauteile gelten – wobei mehrschichtige Konstruktionen schalltechnisch auch als einschalig wirken können, nämlich wenn die Schichten miteinander fest verbunden sind. Mehra gibt in [[117] Mehra 1995] einen detaillierten Überblick hierzu. In der vorliegenden Arbeit werden einschalige Systeme untersucht, die aus zwei fest miteinander verbundenen Membranlagen bestehen. Schallschutztechnisch sind die vorgestellten Lösungsansätze daher als einschalige Bauteile zu anzusehen.

### 5.1.1 Einschalige Bauteile

Die schalldämmende Wirkung wird für ein einschaliges, homogenes, porenfreies und unendlich großes Bauteil mit dem Massengesetz von Berger beschrieben. Es besagt, dass mit einer Verdoppelung der Masse, wie auch mit einer Frequenzerhöhung um eine Oktave, theoretisch eine Verbesserung der Schalldämmung um 6 dB einhergeht. Wie in Abb. 5.1 dargestellt, gilt dies allerdings nur in einem bestimmten, meist tieferen Frequenzbereich zwischen den Eigenschwingungen der Bauteile (Platteneigenfrequenzen  $f_n$ ) und den Auswirkungen der Koinzidenz (Koinzidenzgrenzfrequenz  $f_c$ ).

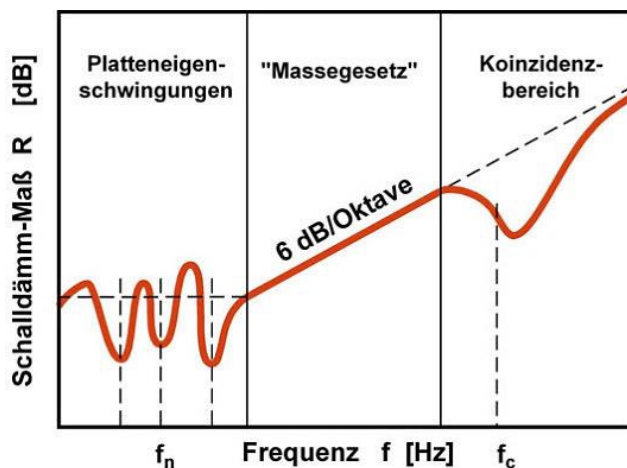
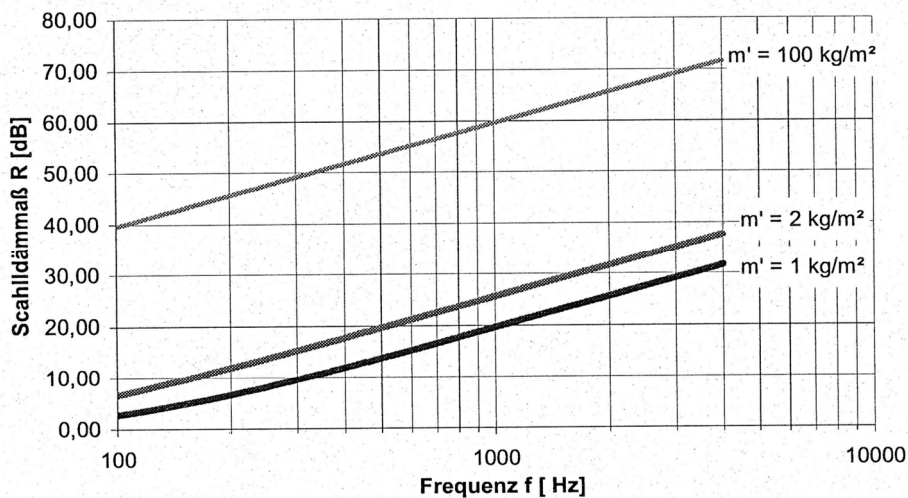


Abbildung 5.1 Schematischer Verlauf der Schalldämmung einschaliger Bauteile in Abhängigkeit von der Frequenz,

aus [114]

Die Eigenschwingungen von Membranen liegen weit unterhalb von 1 Hz, d.h. in einem für den Menschen nicht hörbaren Frequenzbereich. Somit können sie auch keinen Beitrag zur Schalldämmung leisten. Kunststoffe, aus welchen beschichtete Gewebe und Folien für tragende Membranen hergestellt werden, besitzen gute Dämpfungseigenschaften und führen zu einem raschen Abklingen der Eigenschwingungen. Zur Berechnung des Schalldämm-Maßes ( $R$ ) nach dem Massengesetz wird als Werkstoffeigenschaft nur die flächenbezogene Masse herangezogen. Das Schalldämm-Maß ist neben der Bauteilmasse auch von der Frequenz abhängig. Membranen weisen bei niedrigen Frequenzen eine hohe Durchlässigkeit auf, die mit steigender Frequenz abnimmt [[118] Blum/Wagner 2005]. In Abb. 5.2 ist das Schalldämm-Maß in Abhängigkeit von der Frequenz für eine einschalige Membran mit 1 kg/m<sup>2</sup> und 2 kg/m<sup>2</sup> Eigengewicht dargestellt, jeweils im Vergleich zu einem Baustoff mit einem Flächengewicht von 100 kg/m<sup>2</sup> (entspricht 4 cm Stahlbeton). Am Verlauf der Kurve lässt sich ablesen, dass ein zweifaches Eigengewicht zu einer Erhöhung des Schalldämm-Maßes um 6 dB führt, was auch einer Frequenzerhöhung um eine Oktave entspricht. Bei schweren und biegesteifen Bauteilen wird der Einfluss der Schwingungsanregung des Bauteils durch Schallwellen vernachlässigt. Bei Membranen führen Schallwellen als Luftdruckänderung auf die Membranober-

fläche zum Mitschwingen der Membran, was wiederum nach Blum bei niedrigen Frequenzen zu einer noch größeren Durchlässigkeit des Schalls führt [[118] Blum/Wagner 2005].



**Abbildung 5.2** Schalldämm-Maß einschaliger Bauteile unterschiedlicher flächenbezogenen Massen, aus [4]

Des Weiteren weisen dünne und biegesteife Bauteile in hohen Frequenzbereichen ein Minimum an Schalldämmung auf. Die Schalldurchlässigkeit in diesem Bereich beruht darauf, dass bei einer Schallwelle, die in einem bestimmten Winkel auf das Bauteil trifft, eine Resonanz zwischen der Schallwelle und der Eigenschwingung des Bauteils entsteht. Die Spur der auf das Bauteil auftreffenden Schallwelle stimmt mit der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegeschwingung des Bauteils überein. Das Bauteil schwingt mit den Schallwellen mit und gibt diese wieder an die Umgebung ab. Die sehr geringe Biegesteifigkeit von Membranen, die Unabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz bei Membranen, sowie die niedrige Eigenschwingung von Membranen führen dazu, dass dieser Spuranpassungseffekt bei Membranen nicht auftritt [[118] Blum/Wagner 2005].

Werden bei Membrankonstruktionen schalldämmende Maßnahmen ausgeführt, so nimmt im Allgemeinen der reflektierende Anteil der Schallwellen zu. Dies beeinflusst negativ die Raumakustik und verursacht eine Erhöhung der Nachhallzeit, was wiederum zu einer Reduzierung der Sprachverständigung über große Distanzen führt und zugleich die Nutzung von elektroakustischen Beschallungsanlagen erschwert. Daher sind die Auswirkungen von Schalldämmmaßnahmen auf die Raumakustik zwingend zu berücksichtigen.

Grundsätzlich werden bei offenen Geweben, Gewirken und Vliesen Schwingungen der Luftteilchen durch die faserigen Oberflächen der Werkstoffe gebremst. Die Schallenergie wird durch die Reibung der Luft an der Faseroberfläche in Wärmeenergie umgewandelt. Dabei gilt, dass je größer die Faseroberfläche ist, umso höher

ist die Schallabsorption. Um die Witterungsschutzfunktion zu erfüllen, bestehen Membranoberflächen meist aus beschichteten Geweben, deren Beschichtung die Schallabsorption durch ihre Fasern verhindert und zu Schallreflexionen führt. Die beschichteten Membranoberflächen sind meist mechanisch vorgespannt gegenseitig gekrümmt oder durch Überdruck vorgespannt gleichsinnig gekrümmt. Ihre doppelt gekrümmten Flächen besitzen, bis auf die Ausnahme der Kugel, als Gleichgewichtsflächen keine konstante Krümmung. Bei der Schallreflexion wird davon ausgegangen, dass der Schalleinfallswinkel auf die Oberfläche dem Schallausfallwinkel gleicht. Da doppelt gekrümmte Membranflächen unterschiedliche Krümmungsverhältnisse aufweisen, entsteht bei der Reflexion der Schallwellen an der Oberfläche ein sehr diffuses Schallfeld.

Der Einfluss der Vorspannung auf die Schalldämmung wurde bereits am Lehrstuhl für Bauphysik an der Universität Stuttgart untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vorspannung der Membranoberflächen erst bei sehr hohen Werten von ca. 250 kN/m eine nennenswerte Verbesserung der Schalldämmung bewirken kann [[119] Mehra/et al. 2004].

### **5.1.2 Zwei- und mehrschalige Aufbausysteme**

Eine bewährte Methode zur Verbesserung der Schalldämmung und der Raumakustik ist ein mehrschaliger Aufbau. Je nachdem, welche Funktion den einzelnen Schichten zugewiesen wird, existieren zwei Möglichkeiten für den Schichtenaufbau.

#### **Zweischaliges Aufbausystem**

Werden zwei ebene Materialschichten durch eine weichfedernde Zwischenschicht – meist eine Luftschicht – voneinander getrennt, entsteht ein schwingungsfähiges Masse-Feder-System, d.h. eine zweischalige Konstruktion. Zweischalige Bauteile zeigen im Vergleich zu einem einschaligen Bauteil gleicher flächenbezogener Masse eine höhere Luftschalldämmung auf. Diese Verbesserungen treten allerdings erst oberhalb der sogenannten Resonanzfrequenz der Konstruktion auf, wie in Abb. 5.3 schematisch dargestellt.

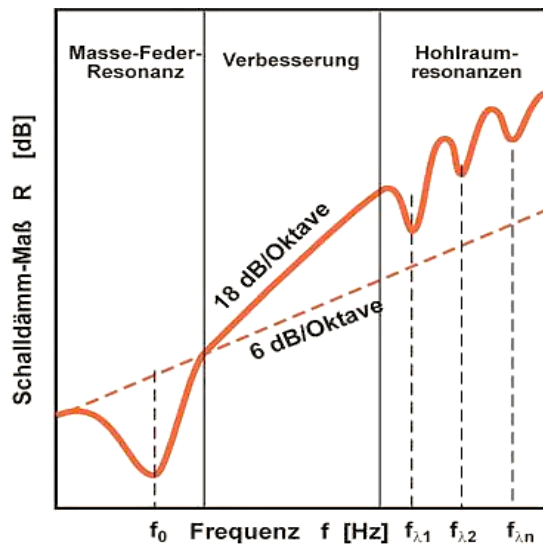


Abbildung 5.2 Schematischer Verlauf der Schalldämmung zweischaliger Bauteile in Abhängigkeit von der Frequenz, aus [114]

$f_0$  Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Systems  
 $f_{\lambda,1}$  Eigenfrequenz des Luftzwischenraumes

Die Verbesserung der Schalldämmwirkung ist auf die bestehende Kopplung der beiden Schalen zurückzuführen, wobei diese über eine eingeschlossene Luftschicht, eine eingebrachte Dämmschicht, oder über eine konstruktive Verbindung gegeben sein kann. Durch die Kopplung wird Schallenergie von der ersten auf die zweite Schale übertragen und von dieser abgestrahlt. Eine bessere Schalldämmwirkung kann erreicht werden, wenn die Kopplung der beiden Schalen gering ist. Der zweischalige Aufbau lässt sich mit einem Schwingungssystem aus zwei Massen (die beiden Schalen) und einer Feder (Kopplung durch Luftschicht oder Dämmschicht) vergleichen. Unterhalb der Resonanzfrequenz  $f_0$  (Eigenfrequenz) des Schwingungssystems schwingen die beiden Schalen unter Zusammendrücken der als Feder wirkenden Zwischenschicht gegeneinander mit maximaler Amplitude [[120] Möser 2012]. In diesem Bereich verschlechtert sich die Schalldämmung; Erst bei höheren Frequenzen tritt eine Verbesserung der Schalldämmung eines zweischaligen Aufbaus auf.

Grundsätzlich hängt die Resonanzfrequenz von der flächenbezogenen Masse der beiden Schalen und der dynamischen Steifigkeit der Zwischenschicht ab. In der Zwischenschicht der beiden Schalen treten je nach Schalenabstand bei mittleren bis hohen Frequenzen Hohlraumresonanzen auf, die auf die Eigenschwingungen des Hohlraumes zurückzuführen sind. Die stehenden Wellen im Schalenzwischenraum machen sich als Einbruch im Verlauf der Schalldämmkurve bemerkbar. Durch die Füllung des Schalenzwischenraumes mit porösem, schallabsorbierendem Dämmstoff kann die Verschlechterung der Schalldämmung durch die Eigenfrequenz minimiert werden. Der Dämmstoff übernimmt eine doppelte Funktion: zum einen vermindert dieser die dynamische Steifigkeit der Luftschicht, zum anderen bedämpft dieser gleichzeitig die Hohlraumresonanzen.

Zusammenfassend ist es im Hinblick auf ein hohes Schalldämm-Maß bei zweischaligen Bauteilen günstig,

- gleichschwere Schalen zu vermeiden,
- einen ausreichenden Schalenabstand einzuplanen,
- den Schalenzwischenraum möglichst vollflächig mit Absorbermaterial zu bedämpfen,
- Körperschallbrücken, die durch feste Verbindungen der beiden Schalen entstehen, zu vermeiden, sowie
- Undichtigkeiten, vor allem im Randbereich, zu vermeiden.

### **Dreischaliges Aufbausystem**

In der Regel werden bei einem dreischaligen Aufbau den einzelnen Schichten exklusiv die lastabtragende, die schalldämmende oder die schallabsorbierende Funktion für die Raumakustik zugewiesen. Grundsätzlich liegt die lastabtragende und witterungsbeständige Schicht an der Außenseite der Gesamtkonstruktion. Die mittlere Schicht übernimmt die Schalldämmung; die innere Schicht ist für die Schallabsorption und die Raumakustik zuständig. Bei der schalldämmenden Schicht wird meist Masse eingesetzt, d.h. die Schallabsorption erfolgt durch offene, unbeschichtete Gewebe und Vliese mit rauen Fasern oder perforierten Folien. Durch die Reibung an der Oberfläche wird die Schallenergie in Wärmeenergie umgewandelt und abgebaut [[111] Koch 2004].

Die Befestigung der Schalldämmungs- und Schallabsorptionsschichten an einer freigespannten textilen Membran ist äußerst kritisch und aufwendig, bei einer massiven und schweren Dämmung nahezu unmöglich. Die einzelnen Schichten sind meist so ausgebildet, dass die Eigenlast der Schicht von ihr selber abgetragen werden kann. Ein Beispiel für einen solchen mehrschaligen Aufbau, der sich durch hohe Schalldämmung auszeichnet, ist die Gebäudehülle des Flughafens von Bangkok (Murphy/Jahn Architekten, Werner Sobek). Das dreischalige Paket besteht aus einer Außenmembran (teflonbeschichtetes Glasfasergewebe), einer beschichteten inneren Membranebene, sowie aus dazwischen auf einem Seilnetz angeordneten, schalldämmenden und transparenten Polycarbonatplatten (7,2 kg/m<sup>2</sup>). Der dreischalige Aufbau der Gebäudehülle führt zu einer Schalldämpfung von 35 dB [[121] Holst 2006].

In der Praxis ist die Ermittlung der Schalldämmung von endlichen einschaligen oder mehrschaligen Wänden wesentlich komplexer als bei den bisher betrachteten Aspekten des Schalldämmverhaltens unendlich ausgedehnter Bauteile, da u.a. diverse Randeinflüsse berücksichtigt werden müssen. Eine detaillierte Diskussion über das Schalldämmverhalten von Wänden ist bei Ackermann [[122] Ackermann 2001] zu finden.

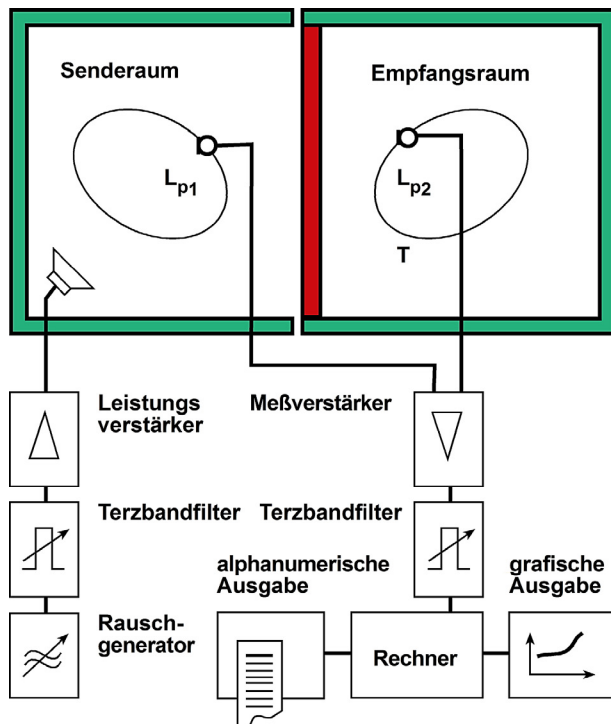
### 5.1.3 Strukturierte Oberflächen

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erzeugten gefalteten Oberflächen wurden aus beschichtetem PES/PVC-Gewebe hergestellt. Die Beschichtung des Gewebes verhindert die Schallabsorption der Fasern und führt zur Schallreflexion. Aus akustischer Sicht werden strukturierte Oberflächen als glatt bezeichnet, wenn die Tiefe ihrer Oberflächenstruktur kleiner als etwa ein Zwölftel der Wellenlänge ist. Bei einer strukturierten Oberfläche mit einer Strukturtiefe von 30 mm wird der Schall unterhalb von 1.000 Hz (Wellenlänge bei 1.000 Hz: 0,34 m) geometrisch reflektiert (Einfallswinkel gleicht dem Ausfallswinkel). An stark strukturierten Oberflächen wird der Schall über einen viel weiteren Winkel diffus gestreut. Konkav gekrümmte Flächen streuen die reflektierten Strahlen, während konkav gekrümmte Flächen diese konzentrieren [[123] Mommertz 2008]. Rechteckige, dreieckige und zylindrische Grundformen erzielen eine hohe Diffusität der Reflexionen, die einen Frequenzbereich von etwa 1 bis 2 Oktaven umfasst. Durch die Kombination unterschiedlicher Strukturen kann ein breites Frequenzgebiet erfasst werden, wobei zylindrische und dreieckförmige Formen breitbandiger wirken als rechteckige. Der Diffusitätsgrad reflektierender geometrischer Strukturen hängt von der Strukturbreite  $b$ , der Strukturtiefe  $d$  und der Strukturperiode  $g$  ab. Besonders wirkungsvoll ist, wenn die Strukturbreite  $b$  zumindest gleich oder größer als die halbe Strukturperiode  $g$  gewählt wird. Die Strukturperiode  $g$  soll etwa ein- bis zweimal so groß sein wie die Schallwellenlängen. Für die Strukturtiefe  $d$  gelten Werte von 0,3 bis 0,5 der Strukturbreite als zielführend [[124] Tennhardt 1988].

Wenn eine Struktur beispielweise in dem für die verbale Kommunikation wichtigen Frequenzbereich von 500 bis 1.000 Hz optimal wirksam sein soll, so ist eine Strukturperiode  $g$  von 0,5 bis 1 m erforderlich. Je nach Art der Struktur ergeben sich Strukturturen  $d$  von 0,1 bis 0,5 m [[114] Fasold/Veres 2003]. Die Strahlverfolgung der diffusen Reflexionen lässt sich mithilfe akustischer Computersimulationen nachvollziehen. Bei geometrisch komplizierten Faltstrukturen wird jedoch die Ermittlung der Reflexionswirkung von Flächen im Akustiklabor angeraten.

### 5.1.4 Messverfahren zur Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauteilen

Messungen zur Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauteilen werden üblicherweise an Prüfobjekten durchgeführt, die zwischen zwei Räumen (Sende- und Empfangsraum) eingebaut sind. Bei diesem sog. Zweiraumverfahren wird der Schalldämmwert des zu prüfenden Bauteils in einem bauakustischen Labor mit einem entsprechenden Prüfstand erfasst. Wie in Abb. 5.4 dargestellt, befindet sich das Prüfobjekt zwischen dem Sendes- und dem Empfangsraum.



**Abbildung 5.4** Schemazeichnung von Messaufbauten zur Ermittlung der Luftschalldämmung eines Bauteiles im Bauakustiklabor (Zweiraumverfahren), aus [114]

Im Senderaum werden mithilfe eines geeigneten Lautsprechers Luftschallwellen erzeugt, welche auf das Trennbauteil und die angrenzenden Bauteile treffen, die daraufhin zu Schwingungen angeregt werden. Der Prüfschall (Terz-, Oktav- oder Breitband-Rauschen) muss bestimmte Anforderungen hinsichtlich Schallleistung, Frequenzverlauf und Richtcharakteristik erfüllen. Im Empfangsraum setzt sich dann der Schall aus Anteilen zusammen, die auf direktem oder indirektem Weg aufgrund der Schallabstrahlung des Trennbauteils bzw. der flankierenden Bauteile entstehen. Daraufhin werden die mittleren Schalldruckpegel  $L_{p1}$  und  $L_{p2}$  im Senderaum und Empfangsraum mithilfe von Kondensatormikrofonen an unterschiedlichen Positionen gemessen und zeitlich sowie räumlich gemittelt. Das Schalldämm-Maß  $R$  wird mithilfe einer Messung aus der Differenz der Schalldruckpegel im Empfangsraum  $L_{p2}$  und im Senderaum  $L_{p1}$  gebildet [[122] Möser 2007]. Das Schalldämm-Maß  $R$  ergibt sich wie folgt:

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \lg \frac{S}{A} \quad [dB] \quad (5.2)$$

- $L_{p1}$ : Schallpegel im Senderaum
- $L_{p2}$ : Schallpegel im Empfangsraum
- $S$ : bezogene Prüffläche
- $A$ : äquivalente Absorptionsfläche

In einem weiteren Schritt wird die Nachhallzeit  $T$  [s] im Empfangsraum bestimmt, um daraus die äquivalente Absorptionsfläche  $A$  [m<sup>2</sup>] mit Hilfe der Sabinischen Formel zu ermitteln:

$$T = 55,3 \frac{V}{AcF} = 0,163 \frac{V}{A} \quad [s] \quad (5.3)$$

- $V$ : Raumvolumen Empfangsraum  
 $A$ : äquivalente Absorptionsfläche  
 $cF$ : Schallgeschwindigkeit in der Luft

Das Schalldämm-Maß  $R$  wird über die Anregungsfrequenz aufgetragen, um so eine Schalldämmkurve zu erhalten – beispielsweise für den bauakustisch interessanten Frequenzbereich von 100 bis 3.200 Hz.

### 5.1.5 Bewertung der Schalldämmung

Die Nachweise über eine ausreichende Schalldämmung von Bauteilen können durch Berechnungen, durch akustische Messungen oder durch Vergleiche mit als geeignet anerkannten Ausführungen erbracht werden. Zur einfacheren Handhabung werden diese Nachweise allerdings für das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  durchgeführt. Um das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  durch eine Einzahlangabe hinreichend charakterisieren zu können, wurde das Bezugskurvenverfahren nach DIN EN ISO 717 [[123] DIN EN ISO 717-1] eingeführt, das durch einen Vergleich der frequenzabhängigen Schalldämmkurve mit einer sogenannten Bezugskurve bzw. Sollkurve gebildet wird [[125] Möslers 2012]. Diese Kurve bildet den idealisierten Verlauf des Schalldämm-Maßes einer 25 cm dicken Vollziegelwand ab. Das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  erhält man dadurch, dass die Bezugskurve gedanklich soweit nach oben oder unten verschoben wird, bis die Summe der Unterschreitungen durch die frequenzabhängig vorliegende Schalldämmkurve so groß wie möglich wird, aber höchstens 32,0 dB bei Werten in 16 Terzbändern erreicht. Dies entspricht jeweils einer zulässigen mittleren Unterschreitung von 2 dB.

Das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  ist dann der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz. Zur Veranschaulichung des Bezugskurvenverfahrens ist in Abb. 5.5 ein Beispiel dargestellt.

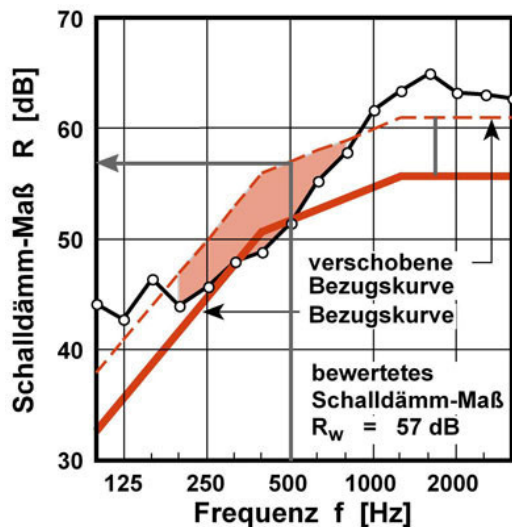


Abbildung 5.5 Beispiel für die Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w$ , aus [114]

## 5.2 Bisherige Ansätze und Methoden zur Verbesserung der schalldämmenden Eigenschaften von Membrankonstruktionen

Wie bereits aufgezeigt, stellt die Erhöhung der flächenbezogenen Masse zweischaliger oder mehrschaliger Systemaufbauten mit Hohlraumfüllung nach dem heutigen Stand der Praxis den wesentlichen Einflussparameter auf die Schalldämmung von textilen Gebäudehüllen dar.

Bereits in den 1960-er Jahren wurde in [[127] Kurtze 1959] die Schalldämmung leichter homogener und einschaliger Wände mit zusätzlicher Massenbelegung experimentell untersucht. In weiteren Arbeiten [[128] Hashimoto/Katsura 1991] wurde gezeigt, dass eine zusätzliche Massenbelegung die Schalldämmung von Membranen in bestimmten Frequenzbereichen verbessert. Die partiell beschwerten Konstruktionen zeigen dabei im Vergleich zu unbeschwerten Varianten eine Verbesserung des Schalldämm-Maßes  $R$  von 5 bis 11 dB.

Um die Masse textiler Gebäudehüllen zu erhöhen, wird für die technische Umsetzung derzeit meistens witterungsbeständiges Abstandsgewebe verwendet, das aus zwei Gewebedecklagen besteht. Diese werden dabei durch abstandshaltende Stegfäden in einem Abstand von üblicherweise 3,5 - 500 mm gehalten. Das Gewebe mit einem bspw. sandgefülltem Zwischenraum kann in verschiedenen Formen konfektioniert werden und erreicht bei einer Stärke von bspw. 20 mm eine Schalldämmwirkung von ca. 35 dB [[98] Knippers/et al. 2010]. Die Firma Heywinkel bietet eine ähnliche Lösung mit Zweiwandgewebe aus PES/PVC an, woraus 22 mm starke Wandscheiben hergestellt werden können. Diese lassen sich bspw. mit Quarzsand reversibel befüllen und sind damit aufgrund der fehlenden Resonanzfrequenzen mit ihren 38 dB einer 100 mm starken Betonwand ebenbürtig. Das Zweiwandge-

webe kann auch mit Luft aufgeblasen werden und erreicht hier einen Schalldämmwert von 18 dB [[129] Gengnagel 2005].

Sofern geringere Schalldämmwerte ausreichen, sind extrem leichte und selbsttragende pneumatische Schallschutzwände aus Membranen oder Folien mit 1-3 kg/m<sup>2</sup> ein möglicher Lösungsansatz. Mit ihnen können modulare wie auch freie Formen in kurzen Montage- und Demontagezeiten realisiert werden. Die aufblasbaren Schallschutzschirme von Mehra bestehen aus einer geschlossenen Hülle, die in der Regel mit Luft befüllt wird, sowie aus mehreren längst angeordneten Luftkammern mit elastischen Verbindungsstegen zwischen den äußeren Schalen. Gezielte Formgebung und Randausbildung des Schirmes ermöglichen die Reduzierung der Schallbeugung. Die Schalldämmung der Doppelschale ist oberhalb der durch die Masse und den Abstand der Schale bestimmten Resonanzfrequenz erheblich höher als bei einer gleich schweren Einzelschale [[130] Mehra 2002]. Durch den hohen Stützluftdruck verbessert sich hier zwar die niederfrequente Dämpfung, doch die höherfrequente Dämpfung verschlechtert sich dagegen.

Der Einfluss der flächenbezogenen Masse und des Schalenabstandes auf die Schalltransmission und Schallabsorption von doppelschaligen Membrankonstruktionen wurde am Institut für Bauphysik (IBP) der Universität Stuttgart in [[131] Leister/Drotleff 2005] untersucht. Unter Variation der flächenbezogenen Massen von 0,5 kg/m<sup>2</sup> bis 3,3 kg/m<sup>2</sup> bei einem Schalenabstand von 0,5 m haben rechnerische und messtechnische Untersuchungen gezeigt, dass bei den untersuchten Varianten im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 4.000 Hz Luftschalldämm-Maße von 10 dB bis 40 dB erreicht werden können. Nach Blum hängt die Wirkung der Schalldämmung bei einem zweischaligen Aufbau im Wesentlichen vom Schwingungsverhalten der beiden Membranoberflächen und dem Schalenabstand ab. Schwingen die beiden Membranen gleichphasig, d.h. ist der Schalldruck auf beiden Membranen gleich, werden die Membranen in dieselbe Richtung ausgelenkt und die Schalldämmung ist gering. Die beste Schalldämmung wird erreicht, wenn die Membranflächen gegenphasig schwingen. Für die niedrigen Frequenzen ergibt dies die Erfordernis nach einem großen Abstand, der mit der Frequenz abnimmt. Bei einer Masse von 1 kg/m<sup>2</sup> ist für eine Frequenz von 100 Hz ein Abstand von 1,7 m erforderlich, während für eine Frequenz von 1.000 Hz ein Abstand von 17 cm ausreicht [[118] Blum/Wagner 2005]. Zweischalige Konstruktionen sind dann besonders effektiv, wenn beide Schalen unterschiedlich dick und schwer sind und damit verschiedene Eigenresonanzfrequenzen aufweisen.

Durch einen mehrschaligen Aufbau inklusive Befüllen des Zwischenraumes – auch als Multilayer-Aufbausystem bezeichnet – können textile Gebäudehüllen gute Schalldämmwerte erreichen, ohne dass dabei der Vorteil des leichten und flexiblen Materials aufgegeben wird. Basierend auf dem Konzept der adaptiven, mehrlagi-

gen textilen Gebäudehülle entwickelte Schmid [[132] Schmid/ et al. 2015] in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart verschiedene Prototypen mit mehrlagigen Systemaufbauten für unterschiedliche akustische Anwendungsfälle. Durch die Einbringung einer offenporigen Verbundvliesstofflage zwischen zwei Membranlagen erreicht der Systemaufbau ein bewertetes Schalldämm-Maß von 25 dB. Die Ergänzung der flächenbezogenen Masse um ca. 18 kg/m<sup>2</sup> durch ein mit Flüssigkeit gefülltes Taschengewebe führt im selben Systemaufbau zu einer weiteren Steigerung des Schalldämmvermögens auf 34 dB. Durch die variable Fluidfüllung des Taschengewebes kann der Reflexions- bzw. Absorptionsgrad entsprechend der Nutzung des Innenraums beeinflusst werden. Die Verwendung des Silicat-Aerogel gefüllten Abstandsgewirkes in dem mehrschaligen Systemaufbau zeigt eine deutliche Verbesserung des Schalldämm-Maßes über alle Frequenzen hinweg. Der Aufbau erreicht damit ein bewertetes Schalldämm-Maß von 39 dB und ermöglicht gleichzeitig eine Belichtung von Räumen mit natürlichem, blendfreiem Licht. Die Forschungsergebnisse bestätigen, dass die textile Gebäudehülle als ein mehrlagiger Systemaufbau, dessen Zwischenraum bedämpft ist und dessen flächenbezogene Masse gezielt erhöht wird, weitreichenden bauphysikalischen Anforderungen gerecht werden kann.

In Systemaufbauten, bei welchen harte und weiche, bzw. leichte und schwere Werkstoffe zusammentreffen, wird deutlich, dass die Materialführung besonderer Konstruktionsformen und Materialstrukturen bedarf. Die Ausbildung von Faltstrukturen in der Hülle bietet dafür eine geeignete Lösung, bei der zugleich Funktionsmaterialien integriert und die architektonische Intention einer sinnlich erlebbaren Oberfläche unterstrichen werden kann.

### 5.3 Experimentelle Untersuchung der akustischen Wirksamkeit von Faltstrukturen

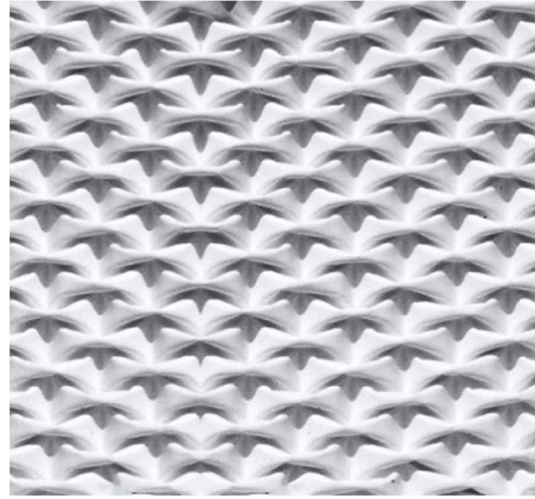
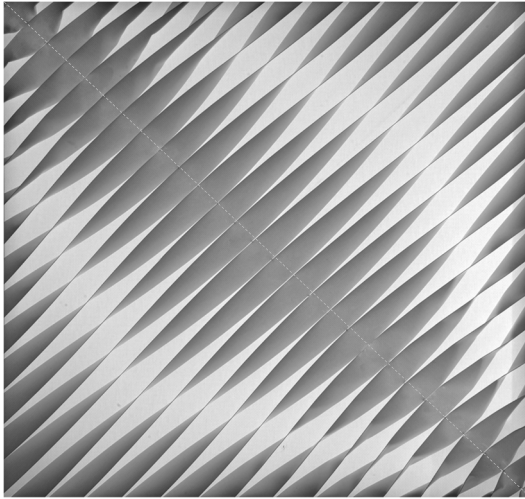
Um zu überprüfen, inwiefern bestimmte Systemlösungen mit befüllten Faltstrukturen zur Verbesserung der schalldämmenden Wirkung beitragen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Versuche zur Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w$  durchgeführt. Die Versuche erfolgten im Labor für Bauakustik an der Hochschule Wiesbaden, Fachbereich für Architektur und Bauingenieurwesen (zugelassenes Prüflabor). Die Messungen richteten sich an der Norm DIN ISO 10140 [[133] DIN ISO 10140] aus. Es wurde ein Fensterprüfstand genutzt, an dem üblicherweise Fenster und andere kleinformatige Bauteile geprüft werden.

Die akustischen Untersuchungen erfolgten in zwei Durchgängen. Im ersten Durchgang wurden vier unterschiedliche Faltstrukturen aus einer einlagigen Membrane auf ihre akustische Wirksamkeit geprüft. Im zweiten Durchgang wurde eine der vier Faltstrukturen mit verschiedenen Funktionsmaterialien befüllt und wiederum

auf ihre akustische Wirksamkeit geprüft. Alle Probekörper wurden aus dem preiswerten Polyestergewebe „PVC-beschichtet“, Typ III (Flächengewicht  $1060\text{g/m}^2$ ) hergestellt. Bei diesem Polyestergewebe ist eine akustische Vergleichbarkeit mit dem (teuren) PTFE-Gewebe (Flächengewicht  $1080\text{ g/m}^2$ ) gegeben, das für die Generierung von Faltstrukturen in Hinblick auf Faltbarkeit, Knickbeständigkeit und Lichtdurchlässigkeit optimal ist. Die verwendeten Probekörper haben eine Größe von  $116/116\text{ cm}$  und sind damit kleiner als die Prüföffnung im Labor. Aus diesem Grund wurde die verbliebende Fläche mit einer hochschalldämmenden Konstruktion verschlossen. Einbau der Probekörper und Messungsdurchführung wurden durch Fachpersonal des Labors unterstützt.

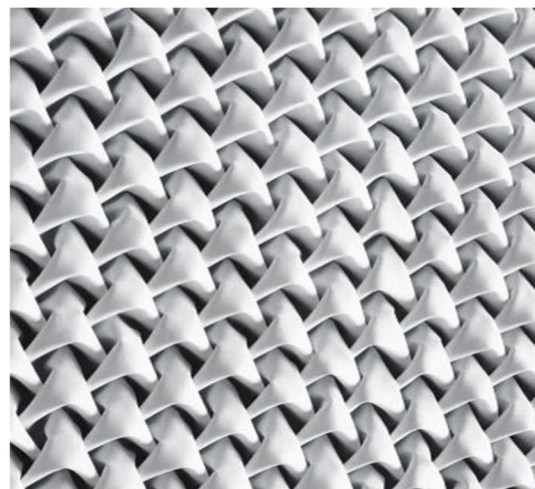
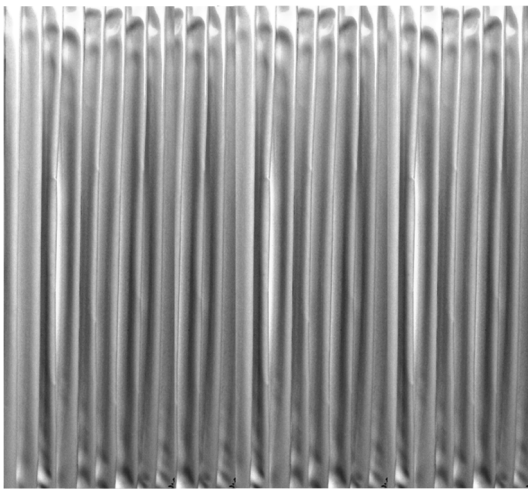
### **5.3.1 Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes $R_w$ bei Versuchsreihe 1**

Für die akustischen Messungen wurden zwei Faltstrukturen in Längsfaltung, sowie zwei Faltstrukturen in Facettenfaltung zugrunde gelegt. Die Faltstrukturen charakterisieren sich durch zweifachen bzw. dreifachen Materialverbrauch (Ausgangsfläche ca.  $2.25\text{ m}^2$  bzw. ca.  $3.35\text{ m}^2$ ). Bei Probe 1 wurden auf der glatten und leicht vorgespannten Membrane über die Diagonale  $50\text{ mm}$  breite Streifen aufgenäht und einmal umgedreht, sodass eine Art verdrehter Längsfaltung entsteht. Die Faltung erzeugt unterschiedliche Strukturturen von maximal  $50\text{ mm}$ . Probe 2 entspricht einer Facettenfaltung, bei der immer zwei Raffpunkte versetzt miteinander vernäht wurden. Die Faltstrukturen erreichen eine Strukturweite von  $250\text{ mm}$  und eine Strukturweite von  $50\text{ mm}$ . Zudem bilden sie eine äußerst stabile Oberflächenstruktur, deren Rückseite sich leicht befüllen lässt. Eine klassische Form der Längsfaltung spiegelt Probe 3 wieder, bei der die  $50\text{ mm}$  breiten, vertikalen Falten parallel und liegend zueinander angeordnet sind. Probe 4 ist auf Basis von V-Falten punktuell gerafft und erzeugt pfeilförmige Strukturen mit einer Kantenlänge von ca.  $225\text{ mm}$  und einer maximalen Strukturweite von  $75\text{ mm}$ .



**Abbildung 5.6** Probe 1, Längsfaltung mit diagonal verdrehten Streifen, zweifacher Materialverbrauch (Flächengewicht: 2,38 kg/m<sup>2</sup>)

**Abbildung 5.7** Probe 2, Facettenfaltung, punktuell und versetzt geraffte Struktur, zweifacher Materialverbrauch (Flächengewicht: 2,34 kg/m<sup>2</sup>)



**Abbildung 5.8** Probe 3, liegende Längsfaltung parallel verlaufend, dreifacher Materialverbrauch (Flächengewicht: 3,53 kg/m<sup>2</sup>)

**Abbildung 5.9** Probe 4, Facettenfaltung mit V-förmig gerafften Strukturen, dreifacher Materialverbrauch (Flächengewicht: 3,47 kg/m<sup>2</sup>)

Für die Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes für Versuchsreihe 1 sind die folgenden Angaben relevant:

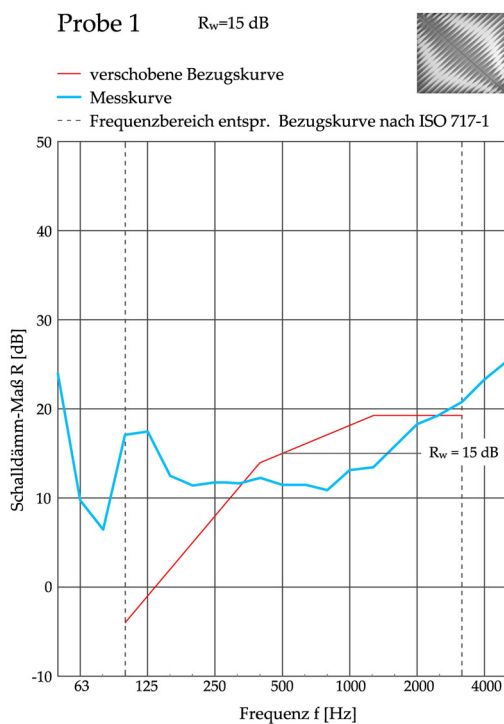
- Aufbau des Probekörpers: einlagige und unterschiedlich gefaltete Membranoberflächen aus PES/PVC, Typ III
- Prüffläche: 116 x 116 cm = 1.34 m<sup>2</sup>
- Flächengewicht:
 

Probe 1:	m = 2,38 kg/m <sup>2</sup>
Probe 2:	m = 2,34 kg/m <sup>2</sup>
Probe 3:	m = 3,53 kg/m <sup>2</sup>
Probe 4:	m = 3,47 kg/m <sup>2</sup>

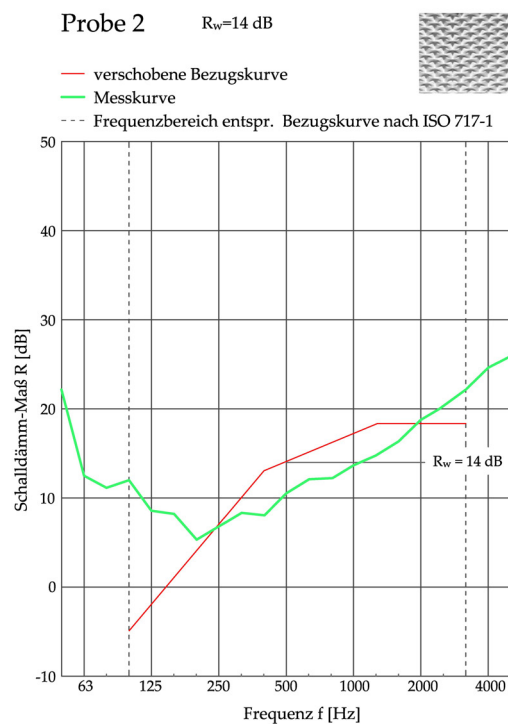
- Prüfnorm: DIN EN ISO 10140
- Prüfdatum: 24.05.2012
- Prüfschall: Rosa Rauschen
- Volumen des Senderraumes: 57,9 m<sup>3</sup>
- Volumen des Empfangsraumes: 60,2 m<sup>3</sup>
- Lufttemperatur in den Prüfräumen: 19°C
- Luftfeuchte in den Prüfräumen: 55%

Als Referenzmessung wurde zuerst das bewertete Schalldämm-Maß einer einlagigen und glatten PES/PVC Membran, Typ III, bestimmt. Der Schalldämmwert liegt hier bei 13 dB, was für eine einlagige und luftdichte Membran mit einer Masse von etwa 1 kg/m<sup>2</sup> üblich ist.

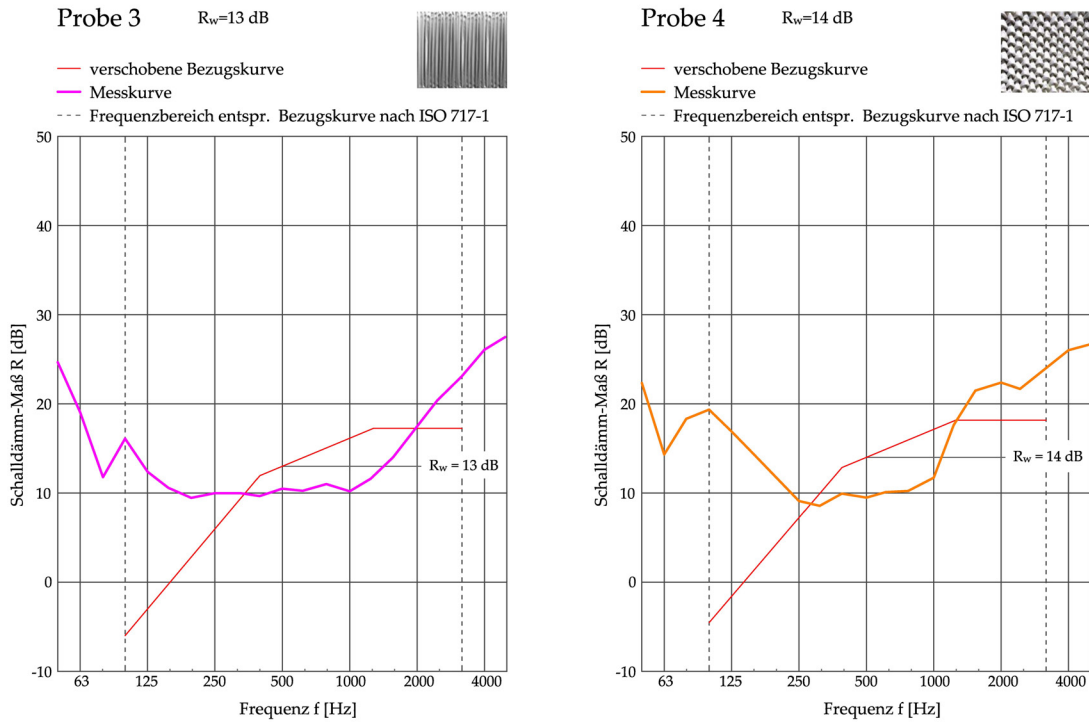
Im Folgenden sind die Schalldämm-Maße der vier Probekörper aufgeführt. Die Auswertung der Messergebnisse wurde nach dem Bezugskurvenverfahren [[126] DIN EN ISO 717-1 1997] durchgeführt. Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.



**Abbildung 5.10** Gemessene Schalldämm-Maße  $R_w$  in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 1 ( $m = 2,38$  kg/m<sup>2</sup>)



**Abbildung 5.11** Gemessene Schalldämm-Maße  $R_w$  in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 2 ( $m = 2,34$  kg/m<sup>2</sup>)

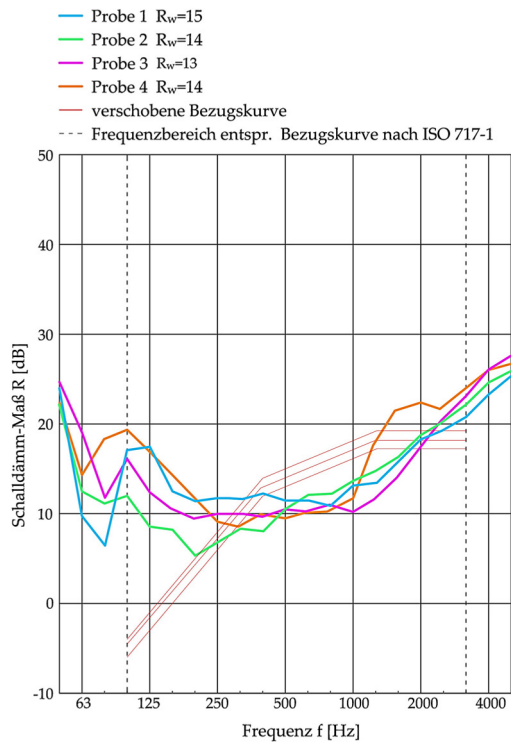


**Abbildung 5.12** Gemessene Schalldämm-Maße  $R_w$  in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 3 ( $m = 3,53$  kg/m<sup>2</sup>)

**Abbildung 5.13** Gemessene Schalldämm-Maße  $R_w$  in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 4 ( $m = 3,47$  kg/m<sup>2</sup>)

### 5.3.2 Diskussion der Messergebnisse der Versuchsreihe 1

Abbildung 5.14 stellt die gemessenen Schalldämm-Maße in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz aller vier Probekörper im Vergleich dar.



**Abbildung 5.13** Vergleich der gemessenen Schalldämm-Maße in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei den Probekörpern 1, 2, 3 und 4

Die Messergebnisse zeigen, dass Faltstrukturen bzw. die Strukturierung der Membranoberfläche in den gewählten Dimensionen trotz Massenerhöhung keinen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Schalldämmwerte leisten. Die dreidimensionalen Faltstrukturen bei den Probekörpern 2, 3 und 4 wirken akustisch gesehen jeweils wie eine einlagige, glatte Membran. Die Faltstrukturen des Probekörpers 1 erzeugen relativ betrachtet die beste Schalldämmwirkung, die vermutlich auf die verstärkte Reflexion der Schallwellen an den scharfen Kanten der verdrehten Membranstreifen zurückzuführen ist. Trotz des dreifachen Materialverbrauches weisen Proben 3 und 4 eine vergleichbare Dämmwirkung zu einer einlagigen, glatten Membran mit der Masse von ca.  $1\text{kg/m}^2$  auf. Im Frequenzbereich zwischen 250 - 1.000 Hz weisen die Probekörper mit dreifachem Flächengewicht einen nahezu waagerechten Kurvenverlauf bei ca. 10 dB auf. Erst bei höheren Frequenzen ab 1.000 Hz steigt die Schalldämmkurve extrem an. Bei Probe 2 mit zweifachem Flächengewicht beginnt die Schalldämmkurve bereits bei ca. 200 Hz zu steigen.

Es lässt sich vermuten, dass es an den strukturierten Oberflächen zu verstärkten Schallinterferenzen kommt. Die Reflexionsvorgänge an den strukturierten Oberflächen hängen wesentlich vom Verhältnis der Schallwellenlänge zu den Strukturabmessungen (Strukturbreite, Strukturtiefe, Strukturperiode) der reflektierenden Flächen ab. Daher ist für verschiedene Frequenzen mit unterschiedlichen Reflexionswirkungen zu rechnen.

Bei den Faltstrukturen der Probekörper 2 und 4 handelt es sich um eine geraffte Facettenfaltung, die zahlreiche kleine und gekrümmte Flächen bildet. Die konvex gekrümmten Flächen streuen die reflektierten Strahlen, die konkav gekrümmten Flächen konzentrieren diese [[124] Tennhardt 1988]. Die Faltung der Probe 4 weist viele konkav gekrümmte Kammern auf, was zur Beeinträchtigung der Schallausbreitung führt. Die größere Strukturierung (Welligkeit) der Oberfläche bewirkt zusätzlich eine Verringerung der Schalldämmung und eine schlechtere Dämpfung der Eigenfrequenzen.

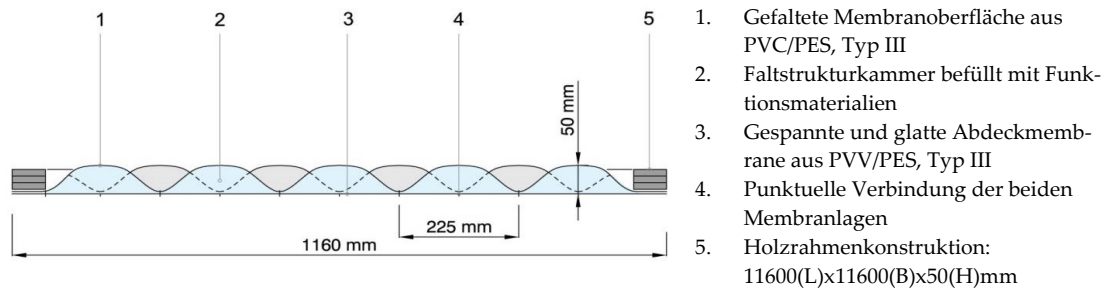
Die gemessenen Schalldämm-Maße zeigen, dass die gefalteten Membranoberflächen trotz der zweifachen bzw. dreifachen Massenerhöhung keine signifikante Verbesserung der Schalldämmwirkung bewirken. Ausgehend vom Massengesetz und von bisherigen Forschungsergebnissen wäre für mechanisch vorgespannte Textilien theoretisch eine Erhöhung der Schalldämmwirkung von 5 bis 6 dB zu erwarten [[119] Mehra/et al. 2004]. Dies trifft für die gefalteten und in einem Rahmen eingespannten Membranoberflächen nicht zu. In den tieferen Frequenzbereichen kleiner als 250 Hz liegen die Kurven relativ hoch bzw. weisen größere Abweichungen nach oben in Relation zur Bezugskurve auf. Im Frequenzbereich zwischen 250 und 1.000 Hz liegen die Kurvenplateaus – ohne signifikante Einbrüche, als würden die Faltstrukturen von den Schallwellen nicht erkannt. Erst bei 1.000 Hz lässt sich die schalldämmende Wirksamkeit der Faltstrukturen in den Messkurven als deutlich nach oben steigend erkennen.

### **5.3.3 Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes $R_w$ bei Versuchsreihe 2**

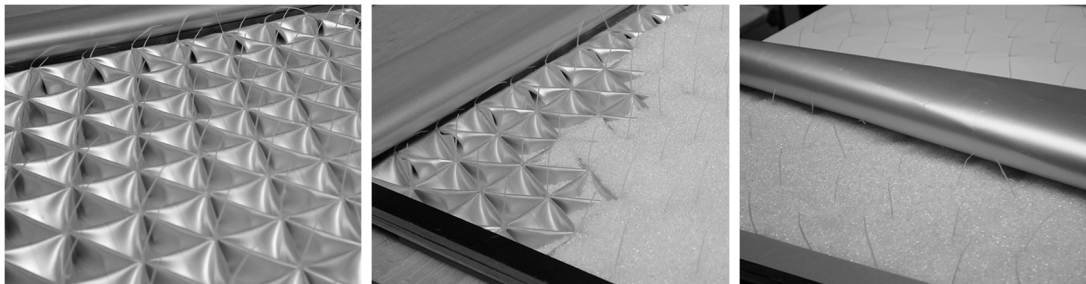
Im zweiten Untersuchungsdurchgang wurde eine der vier Faltstrukturen aus Versuchsreihe 1 mit zwei unterschiedlichen Granulaten befüllt. Da die erste Versuchsreihe ergeben hat, dass Faltstrukturen mit dreifachem Materialverbrauch schlechtere Schalldämmwerte als Faltstrukturen mit zweifachem Materialverbrauch aufweisen, wurde das Faltpattern des Probekörpers 2 (zweifacher Materialverbrauch) ausgewählt. Die Rückseite der Faltstruktur bildet stabile Strukturkammern, die sich mit verschiedenen Materialien füllen lassen. Aufgrund der parallel versetzten, punktuellen Raffung lässt sich die Faltstruktur einfach herstellen. Zudem ergibt das äußere Erscheinungsbild des Musters ein ästhetisch reizvolles Ergebnis.

Im Rahmen der Versuchsreihe 2 wurden drei Probekörper untersucht. Probe 2.1 besteht aus einer gerafften Faltstruktur, einer Luftschicht und einer glatten Abdeckmembran. Die gefaltete und die glatte Membran sind mithilfe von Kabelbindern punktuell miteinander fixiert. Probe 3.3 ist mit einem sehr leichten, transluzenten Aerogel-Granulat der Firma Cabot befüllt (Gewicht: 80 kg/m<sup>3</sup>, Körnung: 3-5 mm). Bei Probe 2.3 wurde ein schwereres Kunststoffgranulat aus Poly-

carbonat (Gewicht:  $1200 \text{ kg/m}^3$ , Körnung:  $4 \text{ mm}$ ) des Herstellers Arteka verwendet. Eine ausführliche Beschreibung der gewählten Füllmaterialien ist in Kap. 6.3 zu finden. Alle Proben wurden aus PE-PVC Typ III der Firma Verseidag hergestellt. Abb. 5.14 bietet eine schematische Darstellung des Probekörperaufbaus der Versuchsreihe 2. In Abb. 5.15 ist die Befüllung der Faltstruktur 2 mit Polycarbonat-Granulat zu sehen.



**Abbildung 5.15** Schnitt des Probekörperaufbaus der Versuchsreihe 2



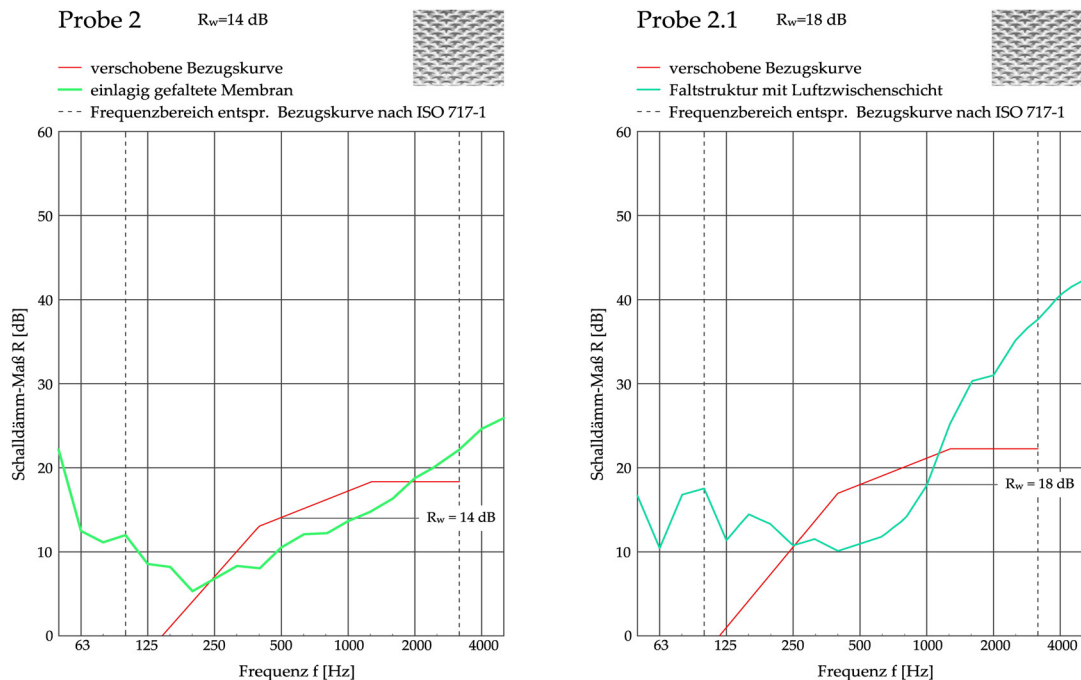
**Abbildung 5.16** Befüllung der Faltstruktur 2 mit Polycarbonat-Granulat

Aus akustischer Sicht handelt es sich bei den Proben 2.1, 2.2 und 2.3 jeweils um ein einschaliges Bauteil. Die gefaltete Membranoberfläche ist punktuell mit Kabelbindern fest mit der glatten Abdeckmembran verbunden. Die dreieckförmigen Faltsachen sind bei Probe 2.2 mit einem sehr leichten Aerogel-Granulat (Füllgewicht ca.  $3.30 \text{ kg/m}^2$ ) befüllt, sowie bei Probe 2.3 mit einem deutlich schwereren Kunststoffgranulat, nämlich Polycarbonat (Füllgewicht ca.  $33.20 \text{ kg/m}^2$ ). Bei der Auswahl der Füllmaterialien spielte neben den unterschiedlichen Gewichtsmerkmalen die Lichtdurchlässigkeit der Füllung eine entscheidende Rolle. Die Transluzenzeigenschaften der befüllten Faltstrukturen werden im nachfolgenden Kap. 6 untersucht. Schließlich erfolgte die Auswahl der Füllmaterialien auch anhand der Frage, inwieweit die Granulatfüllung zur Stabilisierung der Faltstruktur beiträgt.

Im Folgenden sind die Schalldämm-Maße der Probekörper der Versuchsreihe 2 aufgeführt. Es handelt sich jeweils um die Faltstruktur des Probekörpers 2 aus Versuchsreihe 1, die nun mit verschiedenen Füllmaterialien befüllt ist. Für die Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes für Versuchsreihe 2 sind die folgenden Angaben relevant:

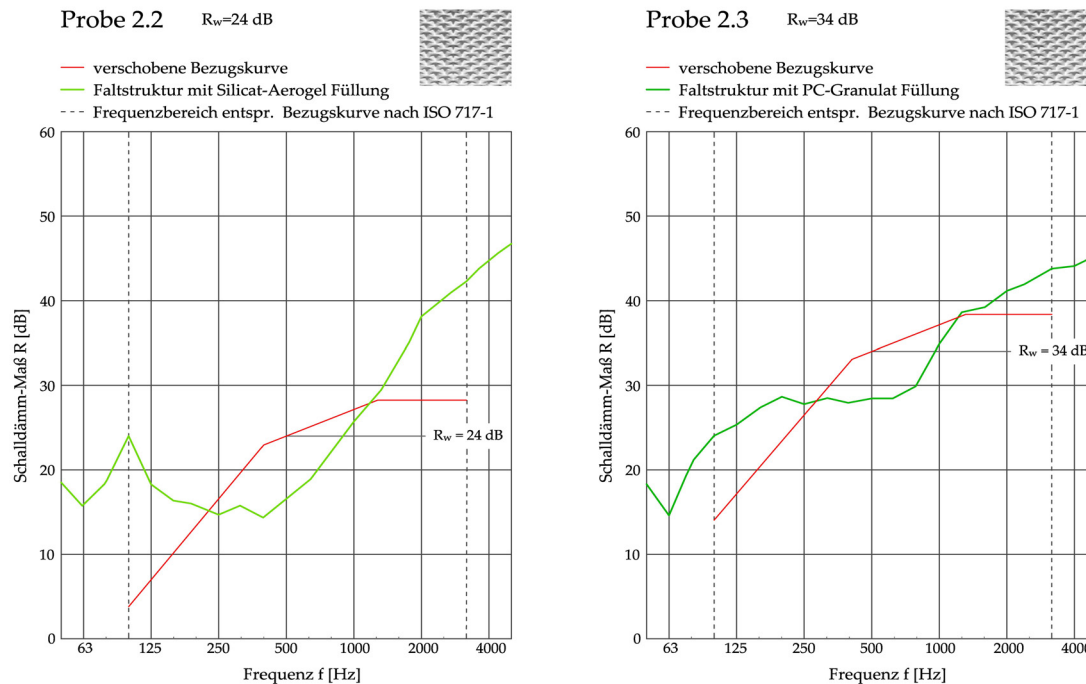
- Aufbau des Probekörpers: gefaltete Membranoberflächen aus PES/PVC, Typ III; Strukturkammern an der Rückseite sind befüllt mit einer Luftzwischen-schicht (Probe 2.1), Silicat-Aerogel (Probe 2.2), Polycarbonat-Granulat (Probe 2.3). Die glatte Abdeckmembran ist jeweils punktuell mit der gefalteten Membranlage fest verbunden.
- Prüffläche:  $116 \times 116 \text{ cm} = 1.34 \text{ m}^2$
- Flächengewicht: Probe 2:  $m = 2,34 \text{ kg/m}^2$  (unbefüllt; Versuchsreihe 1)  
Probe 2.1:  $m = 3,58 \text{ kg/m}^2$   
Probe 2.2:  $m = 6,87 \text{ kg/m}^2$   
Probe 2.3:  $m = 36,74 \text{ kg/m}^2$
- Prüfnorm: DIN EN ISO 10140
- Prüfdatum: 18.10.2012
- Prüfschall: Rosa Rauschen
- Volumen des Senderraumes:  $57,9 \text{ m}^3$
- Volumen des Empfangsraumes:  $60,2 \text{ m}^3$
- Lufttemperatur in den Prüfräumen:  $21^\circ\text{C}$
- Luftfeuchte in den Prüfräumen: 59%

Abb. 5.17-5.20 stellen die gemessenen Schalldämm-Maße  $R_w$  in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei den genannten Probekörpern dar (unbefüllter Probekörper 2 aus Versuchsreihe 1 in Abb. 5.17 nochmals zu Vergleichszwecken dargestellt).



**Abbildung 5.17** Gemessene Schalldämm-Maße  $R_w$  in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz beim unbefüllten Probekörper 2 ( $m = 2,34 \text{ kg/m}^2$ ) (Werte aus Versuchsreihe 1, hier nochmals zum Vergleich)

**Abbildung 5.18** Gemessene Schalldämm-Maße  $R_w$  in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 2.1 ( $m = 3,58 \text{ kg/m}^2$ )



**Abbildung 5.19** Gemessene Schalldämm-Maße  $R_w$  in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 2.2 ( $m = 6,87 \text{ kg/m}^2$ )

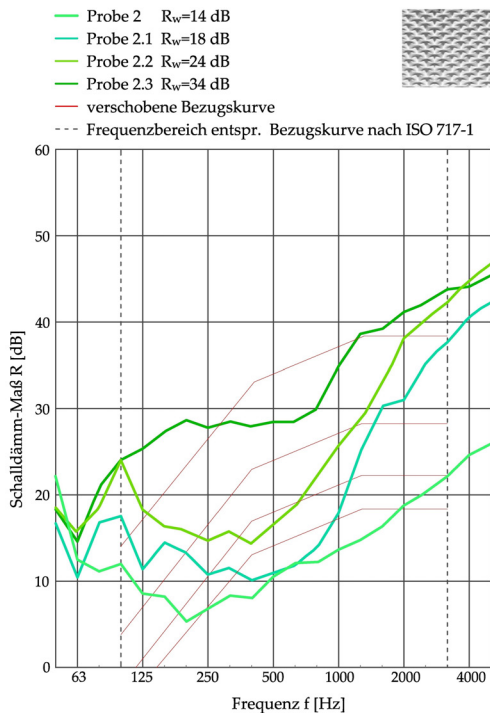
**Abbildung 5.20** Gemessene Schalldämm-Maße  $R_w$  in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei Probekörper 2.3 ( $m = 36,74 \text{ kg/m}^2$ )

### 5.3.4 Diskussion der Messergebnisse der Versuchsreihe 2

Abbildung 5.21 stellt die gemessenen Schalldämm-Maße in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz aller vier Probekörper im Vergleich dar (unbefüllte Probe 2 aus Versuchsreihe 1 nochmals zu Vergleichszwecken; befüllte Proben 2.1, 2.2, 2.3).

Die akustischen Versuche haben ergeben, dass die Faltung der Membranoberfläche an sich nur sehr gering die Schalldämm-Maße beeinflusst. Das Ergebnis lässt sich wie folgt erklären: Zum einen sind sowohl Strukturbreite als auch Strukturtiefe der Falten zu klein dimensioniert, um bei tief-frequenten Schallwellen akustisch wirksam zu sein. Erst in höheren Frequenzbereichen werden Schallwellen verstärkt an der Oberfläche diffus gestreut. Zum anderen sind die Strukturen und die Fläche der gefalteten Membranoberflächen sehr biegeweich, wodurch die Schalldurchlässigkeit zunimmt.

Facettierte Faltungen bieten eine Möglichkeit, die Oberflächenstruktur zu befüllen und somit die akustischen Eigenschaften der Oberfläche zu aktivieren. Durch das Befüllen der Faltstrukturen mit Funktionsmaterialien wird die Masse der Fläche erhöht. Gleichzeitig können die Faltstrukturen damit stabilisiert werden. Die Verbesserung der Schalldämmwirkung ist auf die Erhöhung der Masse, wie auch auf die Kopplung der beiden Membranlagen zurückzuführen.

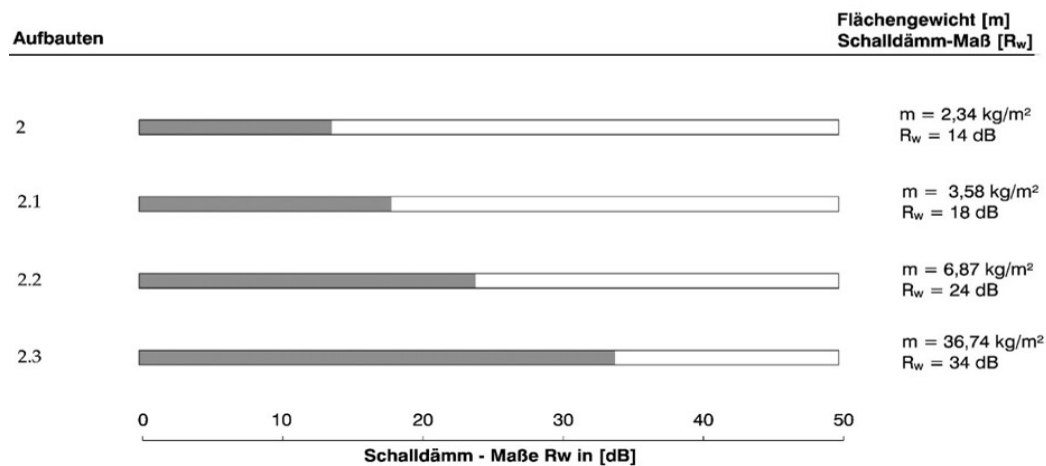


**Abbildung 5.21** Vergleich der gemessenen Schalldämm-Maße in Abhängigkeit der Terzmittelfrequenz bei den Probekörpern 2 (Versuchsreihe 1), sowie 2.1, 2.2 und 2,3

Durch die Kopplung der beiden Membranlagen wird die Schallenergie von der ersten auf die zweite Membranlage übertragen und von dieser abgestrahlt. Im Bereich der Resonanzfrequenz (Eigenfrequenz) des Aufbausystems, das mit einem Schwingungssystem bestehend aus zwei Massen (gefaltete Membranlage als doppelte Masse und glatte Abdecklage mit einfacher Masse) und Feder (Kopplung durch Luftschicht und Granulatfüllung) vergleichbar ist, verschlechtert sich zunächst die Schalldämmwirkung. Eine Verbesserung der Schalldämmwirkung des Aufbausystems tritt erst bei höheren Frequenzen auf. Dies ist am Verlauf der Messkurven der Proben 2.1, 2.2 und 2.3 zu sehen. Bei Probe 2.2 ist ein leichter Einbruch im Verlauf der Schalldämmkurven bei ca. 415 dB bemerkbar, der mit der dynamischen Steifigkeit der Zwischenschicht und der Füllung zusammenhängt. Bei der Schwingung des Granulats wird die Schallenergie durch Reibung abgebaut und gedämpft. Die schwere Probe 2.3 charakterisiert sich durch einen waagerechten Kurvenverlauf im Frequenzbereich zwischen 200 und 800 Hz. Ab 800 Hz steigt die Kurve und erreicht einen Schalldämmwert von über 30 dB.

Verglichen mit dem sehr schweren Polycarbonat-Granulat (Probe 2.3) wirkt das sehr leichte Silicat-Aerogel-Granulat (Probe 2.2) besonders effizient. Probe 2.2 erreicht bei einem Flächengewicht von  $6.87 \text{ kg/m}^2$  und einer maximalen Strukturtiefe von 50 mm ein Schalldämm-Maß von 24 dB. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass das Silicat-Aerogel-Granulat trotz seiner sehr geringen Dichte von  $80 \text{ kg/m}^3$  eine geringe Schallgeschwindigkeit von 100 bis 300 m/s zulässt. Zum Vergleich: Bei

Quarzglas beträgt die Schallgeschwindigkeit 500 m/s; in der Luft 340 m/s [[134] Studie Bundesministerium 1994]. Dagegen erzielt Probe 2.3 mit der nahezu zehnfach schwereren Polycarbonat-Füllung ein Schalldämm-Maß von 34 dB. Abb. 5.22 stellt die Messergebnisse der Versuchsreihe 2 als Balkendiagramme gegenüber. Zum Vergleich ist wiederum Probe 2 aus Versuchsreihe 1 miterfasst.



**Abbildung 5.22** Übersicht der Ergebnisse zur Untersuchung des bewerteten Schalldämm-Maßes in Bezug zur Masse

Die Bewertung der Messkurven durch die Einzahlangabe nach DIN ISO 717-1 und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen müssen im Hinblick auf Ihre Übertragbarkeit in die Praxis mit Vorsicht interpretiert werden. Denn die untersuchten Proben sind nur eine Komponente eines vollständigen Systemaufbaus für textile Gebäudehüllen, das je nach Nutzungsanforderungsprofil anders ausgestaltet werden muss.

So müssen bspw. stationäre Gebäudehüllen mit weiteren funktionalen Schichten und Materialien ergänzt werden, um sämtliche bauphysikalischen Anforderungen zu erfüllen. Durch die Implementierung der Funktionsmaterialien und die damit verbundene Mehrlagigkeit erhöht sich die gesamte Masse des Systems. Es ist zu erwarten, dass dies die schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen nochmals steigert. Mögliche Systemaufbauten für mehrlagige Membrankonstruktionen wurden von Schmidt in [[132] Schmidt 2015] am ILEK der Universität Stuttgart untersucht.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde der Vorspannungsgrad der Membrane weitgehend unberücksichtigt, da dieser keinen signifikanten Einfluss auf ihre Schalldämmwirkung hat [[135] Leistner/et al. 2009]. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die untersuchten, befüllten faltstrukturen einen materialgerechten und ästhetischen Lösungsansatz zur gezielten Optimierung von akustischen Funktionalitäten der textilen Gebäudehülle darstellen. Die untersuchten Probeaufbauten ermöglichen dabei eine Lichtdurchlässigkeit, welche die Nutzung natürlicher Beleuchtung erlaubt.

## 6 Lichtdurchlässigkeit befüllter Faltstrukturen

Dünnwandige und biegeeweiche Membrankonstruktionen besitzen in der Regel sehr ungünstige bauphysikalische Dämmeigenschaften. Um dem entgegenzuwirken kommen häufig mehrschalige Konstruktionen zum Einsatz, bei welchen die bauphysikalische Ertüchtigung über Zwischenschichten und Funktionsmaterialien erlangt wird. Da ein Systemaufbau allerdings verschiedene Anforderungen zu erfüllen hat, die gegensätzlichen bauphysikalischen Prinzipien folgen, können potentielle Lösungen zu einer Anforderung mit Nachteilen in anderer Hinsicht behaftet sein. So wird zur Verbesserung der schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen oft zusätzliche Masse zugeführt, oder es werden mehrlagige Schichten aufgebaut. Beides führt zu einer Beeinträchtigung der Lichtdurchlässigkeitseigenschaften.

Die Lichtdurchlässigkeit stellt ein wichtiges Kriterium dar, welches die Gestaltung und die Funktion der Gebäudehülle wesentlich prägt. Die Lichtdurchlässigkeit der Gebäudehülle spielt für eine natürliche Raumausleuchtung mit Tageslicht, und somit für die nachhaltige Nutzung eines Gebäudes, eine entscheidende Rolle. Eines der Ziele der vorliegenden Arbeit ist es daher, einen Lösungsansatz auszuarbeiten, der die schalldämmenden Eigenschaften verbessert und zugleich eine gute Lichtdurchlässigkeit der textilen Gebäudehülle gewährleistet, ohne dabei die Leichtigkeit des Systemaufbaus zu beeinträchtigen. Der erarbeitete Lösungsansatz basiert auf der Verwendung von transluzenten Materialien. Im vorliegenden Kapitel wird die solare Transmission befüllter Faltstrukturen mit transluzenten Materialien (zwischen zwei Schichten der Faltstruktur) in verschiedenen Varianten experimentell untersucht.

### 6.1 Angewendete Grundlagen der Lichtdurchlässigkeit von befüllten Faltstrukturen in den Experimenten

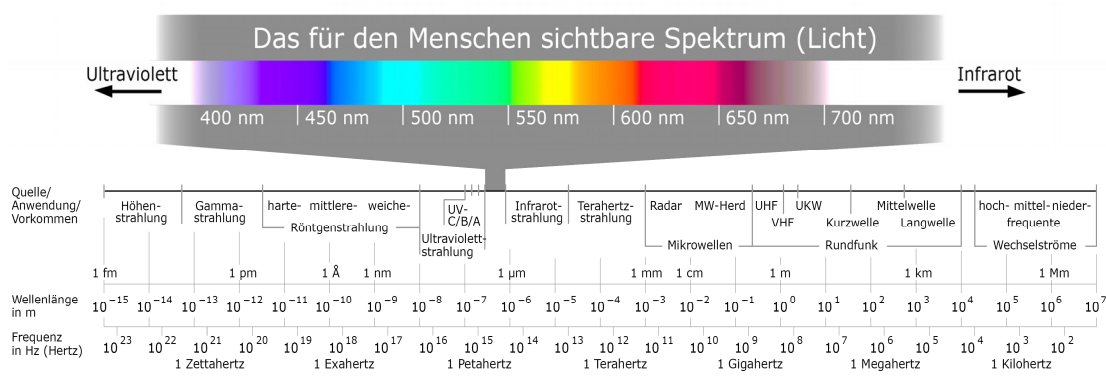
Licht ist der kleine, für das menschliche Auge sichtbare Teil der elektromagnetischen Strahlung, die durch die Emission von Photonen aus einem erhitzten Festkörper entsteht. Der Bereich des sichtbaren Lichts umfasst Wellenlängen von 380 nm (violett) bis 780 nm (rot). Die Ultraviolette (UV) Strahlung ist für das menschliche Auge dagegen nicht mehr zu sehen. Sie befindet sich auf der linken, kurzwelligen Seite des Spektrums und wird wie folgt nochmals differenziert [[136] DIN 5031 Teil 7 1984] (Abb. 6.1):

- UV-A Strahlung (315-380 nm) erreicht weitgehend ungehindert die Erdoberfläche und wird durch herkömmliches Fensterglas durchgelassen;
- UV-B Strahlung (280-315 nm) wird für die Bildung des antirachitisch wirksamen Vitamins D3 gebraucht;
- UV-C Strahlung (100-280 nm) weist um 265 nm herum eine stark keimtötende Wirkung auf und wird bei intakter Ozonsphäre vollständig absorbiert.

Auf der rechten Seite des solaren Spektrums in Abb. 6.1 ist in einem wesentlich längerwelligen Frequenzbereich die Infrarot (IR)-Strahlung abgebildet, auch als thermische Strahlung oder Wärmestrahlung bezeichnet. Der Bereich der IR-Strahlung wird ebenfalls in drei Abschnitte unterteilt:

- IR-A: nahe Strahlung (780-1400 nm);
- IR-B: mittlere Strahlung (1400-3000 nm);
- IR-C: ferne Strahlung (3000-1 Mio nm).

Die IR-Strahlung hat in der Bauphysik eine wesentliche Bedeutung, denn jedes Material strahlt in Abhängigkeit von seiner physikalischen Beschaffenheit und seiner Temperatur Wärme an die Umgebung ab. Dieser Vorgang dauert in der Regel solange an, bis sich das Material (ohne Energiezufuhr) der Temperatur der Umgebung angepasst hat. Sobald das Material bzw. ein Objekt die gleiche Temperatur wie seine Umgebung aufweist, strahlt es genauso viel Energie ab, wie es aus der Umgebung aufnimmt (Gleichgewichtszustand mit kontinuierlichem Strahlungsaustausch).



**Abbildung 6.1** Spektrum der solaren Strahlung, Bild: Horst Frank, Jailbird and Phrood, Wikimedia Commons

Die Intensitätsverteilung der solaren Strahlung und damit die transportierte Energie werden mit den folgenden Circa-Werten angegeben [[137] Witting 2014]:

- 5% im kurzwelligen Bereich der UV-Strahlung;
- 45% im sichtbaren Spektralbereich VIS;
- 50% im langwelligen IR-Wärmestrahlungsbereich.

Jeder Körper mit einer Eigentemperatur über dem absoluten Nullpunkt (0 Kelvin) emittiert Wärmestrahlung in einem für diesen Temperaturbereich spezifischen Frequenzbereich. Die Intensität der Wärmestrahlung kann für eine bestimmte Wellenlänge oder Frequenz mit dem planckschen Strahlungsgesetz berechnet werden. Die gesamte thermisch abgestrahlte Leistung eines Körpers in Abhängigkeit von seiner Temperatur wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz definiert [[138] Boltzmann 1884]. Je wärmer dabei der Körper ist, desto kurzwelliger ist die emittierte Strahlung. Die auf eine Oberfläche auftretende Strahlungsenergie kann je nach Materialeigenschaften dieser Fläche in unterschiedlichem Ausmaß reflektiert, absorbiert oder transmittiert werden. Nach dem Energieerhaltungsgesetz ergibt die Summe aller drei Anteile immer 100%:

$$R + A + T = 1 \quad (6.1)$$

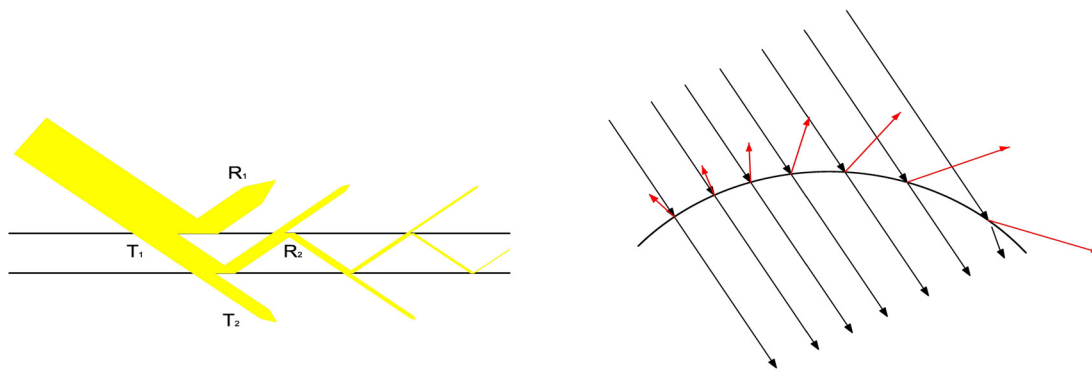
Für den Energieeingang in ein Gebäude und damit für Beleuchtungsfragen sind vor allem die Transmissionswerte von Bedeutung. Sie geben an, wie viel Strahlung durch ein Bauteil fällt. Neben der direkten Strahlungstransmission absorbiert ein Bauteil zudem Strahlung gemäß seinem Absorptionsgrad  $A$ , die in Wärme umgewandelt wird. Die Wärme eines Bauteils beeinflusst wiederum seine Abstrahlung im IR Bereich des solaren Spektrums, die zusätzlich Wärmeenergie dem Innenraum zuführt [[135] Boltzmann 1884]. Der Verbleib dieser Wärme wird durch die Reflexionseigenschaft des Bauteils bestimmt. Ein hoher Reflexionsgrad führt zu geringen Wärmeverlusten nach außen. Hieraus ergibt sich, dass eine energieoptimierte Gebäudehülle (insbesondere im Winter) gleichzeitig über

- eine hohe Transmission im sichtbaren Strahlungsbereich,
- einen hohen Reflexionsgrad im langweiligen Strahlungsbereich, sowie
- gute Absorptionseigenschaften

verfügen muss.

Textile Werkstoffe in der Architektur bieten je nach ihrer Zusammensetzung eine große Bandbreite an Lichttransmissionswerten. Die Werte können bei opaken, beschichteten Geweben bei 0% liegen; Bei transluzenten und beschichteten Geweben können sie in Abhängigkeit von Materialart und -dicke aber auch bis zu 40% betragen.

Bei mehrlagigen Aufbauten werden Reflexions- und Transmissionswerte der direkten und streuenden Anteile durch unterschiedliches Brechungsverhalten je nach Material- und Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Die Werte der Gesamttransmission werden durch Mehrfachreflexionseffekte zwischen den Schichten gemindert. Abb. 6.2 stellt am Beispiel einer zweilagigen und lichtdurchlässigen Membrankonstruktion das prinzipielle Reflexions- und Transmissionsverhalten dar.



**Abbildung 6.2** Gesamtt transmissions- und Reflexionsverhalten einer zweilagigen Membrankonstruktion (links); winkelabhängige Transmission und Reflexion an gekrümmten Oberflächen (rechts), aus [101]

Die Transmission im sichtbaren Bereich des Spektrums durch die beiden Membranelagen ( $T_m$ ) in Abb. 6.2 beträgt insgesamt:

$$T_1 = 15\%, T_2 = 10\%, R_1 = 60\%, R_2 = 70\%$$

$$T_m = (T_1 \cdot T_2) / (1 - R_1 \cdot R_2) = 2,6\% \quad (6.2)$$

An gekrümmten Oberflächen spielt zudem das winkelabhängige Transmissions- und Reflexionsverhalten eine wichtige Rolle. Dieses ist der Grund, warum von einem Standpunkt aus gesehen oftmals verschiedene Effekte sichtbar sind, z.B. unterschiedlich starke Reflexionen oder zum Teil auch Farbverschiebungen in den Reflexionen [[101] Knippers/et al. 2010].

Beim Absorptionsvorgang wird die elektromagnetische Strahlung durch das Material aufgenommen und in Wärmeenergie umgewandelt. Hierdurch steigen Eigen-temperatur und Wärmestrahlung des Materials, was zur höheren Abstrahlung im IR-Bereich des Spektrums führt. Diesen Zusammenhang veranschaulicht der sogenannte Treibhauseffekt: Durch die selektive Durchlässigkeit von weitgehend transparentem Baustoff wie z.B. Glas kann die kurzwellige UV, VIS, und IR-Strahlung transmittiert werden. Das führt dazu, dass die von den erwärmten Bauteilen zurückgesendete, langwelligere Wärmestrahlung dagegen nicht durchgelassen, sondern absorbiert und reflektiert wird.

Lichtdurchlässige Werkstoffe unterscheiden sich deutlich in ihrem frequenzbezogenen Transmissions- und Absorptionsvermögen und damit in ihren licht- und wärmestrahlungstechnischen Eigenschaften. Diese Eigenschaften lassen sich durch Modifikationen in der Polymerstruktur der Werkstoffe, durch Oberflächenbehandlungen, und durch diverse Beschichtungstechnologien beeinflussen. Einer der wesentlichen Vorteile von textilen Materialien besteht in der Möglichkeit, besondere konstruktive Optionen wie bspw. außergewöhnliche Formen und Strukturen miteinander zu kombinieren, ohne dass die Lichtdurchlässigkeit nennenswert negativ

beeinflusst wird. Daher ist man bemüht, die Lichtdurchlässigkeit der Konstruktion nicht zu opfern, wenn zusätzliche Anforderungen hinsichtlich des Schall- oder Wärmeschutzes zu erfüllen sind. In diesem Zusammenhang sei hier nochmals die grundsätzlich konfliktäre Beziehung zwischen den wärme- bzw. schalldämmenden Eigenschaften einer Membrankonstruktion und ihrer Lichtdurchlässigkeit aufgeführt: Erhöht sich die Dämmstoffschicht oder wird zusätzliche Masse zugeführt, so verringert sich die mit diesem Aufbau erzielbare Lichtdurchlässigkeit.

## **6.2 Bisherige Ansätze und Methoden zur Verbesserung der Dämmeigenschaften in Membrankonstruktionen und ihre Auswirkungen auf die Lichtdurchlässigkeit**

Sofern keine lichtdurchlässigen Strukturen notwendig sind, werden in der Praxis bei Membrankonstruktionen meist konventionelle, opake Dämmstoffe verwendet. Ein Beispiel dafür ist das zweilagige Membrandach der Kurklinik Messerberg, bei dem Mineralwolle mit einer Dicke von 2 x 8 cm zum Einsatz kommt. Die Mineralwolle ist dabei zusätzlich mit einer PE-Folie abgedeckt. Die Dämmung ist punktuell fixiert und hat zwecks Hinterlüftung einen Mindestabstand vom 50 cm zur Oberlage. Einen sehr ähnlichen Aufbau zeigt das Dach des Musical Dome in Köln. Der Dachaufbau mit 16 cm Mineralwolle erreicht ein Schalldämm-Maß von 45 dB. Das Kulturzentrum Puchheim zeigt dagegen einen komplexeren Dachaufbau mit zwei Lagen sandgefülltem Abstandsgewebe von je 20 cm Stärke, und zwei Lagen Mineralfaserdämmung der Stärke 8 bzw. 10 cm. Dieser Gesamtaufbau weist ein Schalldämm-Maß von 51 dB auf [[139] Schmid 2011]. Die drei genannten Dachaufbauten sind vollkommen opak.

Mit dem Einsatz transluzenter Dämmmaterialien lässt sich Lichtdurchlässigkeit erzielen, wenn auch nur in einem relativ geringen Bereich. Beispielhaft für ein solches Gebäude ist die sanierte Olympiaschwimmhalle in München, bei der unter dem außenliegenden und mit Acrylglas (PMMA) gedecktem Seilnetzdach eine neue Abhangdecke montiert wurde. Den inneren Raumabschluss der Decke bildet eine transluzente PES/PVC Membran, auf der zwei Lagen imprägniertes Polyestervlies (2 x 35 mm) mit versetzten Stößen liegen (luftdurchströmt). Als Abdichtung unter dem PMMA-gedeckten Seilnetz dient eine transparente ETFE-Folie. Der gesamte Dachaufbau weist eine Lichtdurchlässigkeit von 1,5% auf [[140] Göppert/Linden 2008]. Im Vergleich zu diesem Wert kann das Membrandach des Dedmon Athletic Center der Universität Radford eine höhere Lichtdurchlässigkeit erzielen. Es handelt sich dabei um eine Kombination aus Aerogel-Vlies (aus Zweikomponentenfaser bestehendes Vlies, versetzt mit Aerogel-Partikeln) und transluzentem, PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe. Das Membrandach des Dedmon Athletic Center

weist mit seiner einlagigen Membran und dem 50 mm starken Aerogel-Vlies eine Lichtdurchlässigkeit der Gesamtkonstruktion von 3,5% auf.

Ein vielversprechendes Thema im Membranbau stellt der Einsatz von hochtransluzentem Silica-Aerogel dar. Dieses Hochleistungsmaterial hat nicht nur hervorragende wärmedämmende Eigenschaften, sondern zeichnet sich, in Abhängigkeit der Einbaustärke, durch sehr gute Lichtdurchlässigkeit aus. Für den Einsatz bei Membrankonstruktionen kommt vor allem Silica-Aerogel in Form von Granulat in Frage. Die lichtstreuenden Eigenschaften des Silica-Aerogels bieten eine homogene Durchsicht und sorgen für angenehme, blendfreie Lichtverhältnisse im Innenraum. Dank seiner hydrophoben Eigenschaften bindet Silica-Aerogel-Granulat kein Wasser, sodass dieses wieder aus der dämmenden Ebene ausdiffundieren kann. Wobei wegen der sehr guten Dämmeigenschaften des Silica-Aerogels die Innenseite der Konstruktion in der Regel nicht so kalt wird, dass dort Tauwasser anfallen kann [[141] Cremers/Lautsch 2008].

Beim Solar Decathlon Pavillon des Georgia Institute of Technology in Atlanta wählten die Planer eine Dachkonstruktion, deren Holzrahmenkonstruktion (teilweise) mit ETFE-Folie bespannt und mit 70 mm Silica-Aerogel befüllt ist. Dieses homogene Aufbausystem erreicht eine Lichtdurchlässigkeit von ca. 15% [[101] Knippers/et al. 2010]. Eine weitergehende Beschreibung des Silica-Aerogels wird im nachfolgenden Kap. 6.3.1 vorgenommen.

### **6.3 Experimentelle Untersuchung der solaren Transmission von befüllten Faltstrukturen**

Die im vorangegangenen Kapitel 5 untersuchte Faltstruktur des Probekörpers 2.2, die mit Aerogel-Granulat befüllt worden ist, zeigt großes Potenzial im Hinblick auf die Schalldämmung. Die Verwendung des sehr transparenten PTFE-Gewebes für die Faltstruktur in Verbindung mit ihrer Befüllung mit Aerogel-Granulat zeigt zudem äußerst interessante gestalterische Qualitäten, die sich durch angenehme Lichtdurchlässigkeit auszeichnen.

Um valide und konkrete Aussagen zu Lichttransmissionswerten treffen zu können, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die solare Transmission der befüllten Faltstrukturen 2.1, 2.2. und 2.3 mithilfe eines Pyranometers unter natürlichen Lichtbedingungen in einer Messbox experimentell untersucht. Die Proben wurden mit dem gleichen Systemaufbau wie bei den akustischen Messungen getestet.

#### **6.3.1 Ermittlung der solaren Transmissionswerte befüllter Faltstrukturen**

Die Faltstrukturen der Proben 2.1, 2.2. und 2.3 wurden aus PES/PVC mit PVDF-Fluorlack, Duraskin Typ III des Herstellers Verseidag-Indutex erstellt. Das Material weist nach Herstellerangaben eine Transluzenz von 4% bei 550 nm auf (nach DIN

5036). Mit dem Ziel, einen akustisch vergleichbaren Systemaufbau zu erreichen, der jedoch potentiell höhere Lichttransmissionswerte aufweist, wurden alle Faltproben nochmal zusätzlich aus beschichtetem PTFE-Gewebe hergestellt und mit dem gleichen Systemaufbau untersucht. Das beschichtete PTFE-Gewebe (TENARA 4T40HF) ist aus ePTFE-Fasern (expandiertes Polytetrafluorethylen) gewebt und mit einer Fluorpolymerbeschichtung versehen. Das Material zeichnet sich durch eine hohe Lichttransmission, eine hohe Faltbarkeit und eine antiadhäsive Oberfläche aus. Es weist einen Lichttransmissionswert von 38% nach ASTM E903 bei 450-650 nm auf. Als Füllmaterialien wurden Silikat-Aerogel-Granulat und Polycarbonat (PC)-Granulat verwendet. Die beiden Granulate eignen sich optimal zur Befüllung und Stabilisierung von Faltstrukturen. Sie bieten unterschiedliche, wobei zusammengekommen vielversprechende, Lichtdurchlässigkeitseigenschaften. Große Unterschiede bestehen dagegen hinsichtlich der Rohdichte der beiden Granulate, was sich auf die schalldämmenden Eigenschaften der Proben auswirkt. Abb. 6.3 zeigt das äußere Erscheinungsbild der beiden Füllmaterialien Aerogel-Granulat (links) und Polycarbonat-Granulat (rechts).



**Abbildung 6.3** Füllmaterialien: Aerogel-Granulat (links), Polycarbonat-Granulat (rechts)

Silika-Aerogele sind hochporöse Festkörper auf Basis von organischen Siliziumverbindungen mit einer Granulatgröße von 0,5-4,0 mm und einer Porengröße von 10-100 nm. Der Porenvolumenanteil beträgt mehr als 80%. Der Lichttransmissionsgrad einer Aerogel-Schicht beträgt ca. 80% je 1 cm Einbaustärke. Die Lichttransmissionswerte des Aerogel-Granulats in Abhängigkeit von der Einbaustärke können Tab. 6.1 entnommen werden. Zu den auffälligsten Eigenschaften zählen des Weiteren, neben der Transparenz und der sehr geringen Rohdichte (80-100 kg/m<sup>3</sup>), eine hervorragende Wärmedämmung und eine sehr geringe Schallgeschwindigkeit von 100-300 m/s. Das Material ist zudem sehr leicht, opak bis transluzent, nicht brennbar, umweltfreundlich recyclebar da direkt wiederverwendbar, temperaturbeständig bis 600°C, UV-beständig, sowie hydrophob und langzeitstabil. Mit diesen Eigenschaften eignet sich das Aerogel-Granulat insgesamt besonders gut für die Anwendung im Bereich der Gebäudehülle [[141] Cremers/Lautsch 2008].

Aerogel-Granulat Materialstärke [cm]	Lichttransmission %	Eigenschaften g-Wert	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
1,3 cm	73%	0,73	1,4
2,5 cm	53%	0,52	0,7
3,1 cm	45%	0,43	0,57
3,8 cm	39%	0,39	0,47
5,0 cm	28%	0,26	0,35
5,4 cm	21%	0,21	0,28

**Tabelle 6.1** Eigenschaften des transluzenten Aerogel-Granulats, aus [101]

Die hohe optische Transparenz und ein Brechungsindex von etwa 1,007 bis 1,24 macht Aerogele auch in gestalterischer Hinsicht interessant. Ein Silicat-Aerogel erscheint vor dunklem Hintergrund milchig-blau, da das Siliciumdioxid die kürzeren Wellenlängen (blaue Anteile des weißen Lichts) mehr streut als die längerwellige Strahlung. Dieser Effekt lässt sich in Form der Rayleigh-Streuung auch beim Tageslicht in der Erdatmosphäre beobachten. Aufgrund dieser Eigenschaft erscheinen Silicat-Aerogele halbtransparent bis transparent [[142] Studie Bundesministerium 1994]. In Materialkombination mit hochtransparenten textilen Werkstoffen sorgen die lichtstreuenden Eigenschaften des Aerogels für eine homogene Durchsicht und für angenehme, blendfreie Lichtverhältnisse.

Polycarbonat (PC) ist ein thermoplastischer Kunststoff (Thermoplast), der sich durch hohe Festigkeit, Schlagzähigkeit, Steifigkeit und Härte auszeichnet. Polycarbonat hat eine relativ hohe Wärmeformbeständigkeit und eine geringe Wasseraufnahme. Seine amorphe Struktur führt zu einer hohen Transparenz, die dem Glas ähnliche Lichttransmissionsgrade (88% bei 3 mm Dicke nach DIN 5036-1) und Brechungsindices (1,59 nach ISO 489-A) aufweist. Der Kunststoff ist empfindlich gegenüber UV-Licht im Wellenlängenbereich um 340 nm herum. Eine Bestrahlung von PC mit Licht dieser Wellenlänge, bspw. durch Einsatz unter freiem Himmel, führt ohne Schutzbeschichtung zu Brüchen und mit der Zeit zur Versprödung und Vergilbung des Materials. Die Dichte des Materials liegt bei ca. 1,20 g/cm<sup>3</sup>. PC ist in vielen Einfärbungen von transluzent bis opak erhältlich. Das Material wird auch in Kapillarröhren transparenter Wärmedämmung (TWD) eingesetzt.

Die solare Transmissionswerte der mit Silikat-Aerogel- und Polycarbonat-Granulat befüllten Faltstrukturen wurden mithilfe eines Pyranometers vom Typ CM 11 des Herstellers Kipp und Zonen (Abb. 6.4) ermittelt. Ein Pyranometer erfasst die ein-

treffende globale Strahlungsdichte der Sonne, d.h. die Summe aus direkter und diffuser Solarstrahlung, im Spektralbereich von 310 bis 2.800 nm mit einem Sichtfeld von 180°. Die Messung der Strahlungsstärke wird üblicherweise auf einer horizontalen Fläche durchgeführt. Die Strahlungsstärke setzt sich aus der Direkt- und der Diffusstrahlung zusammen. Das Pyranometer besteht aus einer Abdeckung, die es vor Umwelteinflüssen schützt, sowie aus einer geschwärzten Thermosäule. Diese Thermosäule spricht auf die insgesamt aufgenommene Energie an und ist thermisch nichtselektiv gegenüber der spektralen Verteilung der Strahlung. Dies hat zu Folge, dass der Sensor auch gegenüber langwelliger Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung  $\lambda > 3.000$  nm) aus der Umgebung (z.B. aus dem Inneren des Glasdomes) empfindlich ist. Die Strahlungsenergie wird durch eine schwarz beschichtete Scheibe absorbiert. Die hierbei entstehende Wärme wird durch einen Thermowiderstand an die Wärmesenke, d.h. an den Pyranometerkörper, abgegeben. Die Temperaturdifferenz auf dem Thermowiderstand der Scheibe erzeugt eine Spannung. Der Sensor hinter zwei Glasdomes misst die gleichmäßige Transmission der direkten Strahlung. Das Ausgangssignal ist mittels eines Kalibrierfaktors direkt proportional zur Bestrahlungsstärke, die in Watt/Quadratmeter gemessen wird [[143] Kipp/Zonen 2012].



**Abbildung 6.4** Pyranometer vom Typ CM 11 des Herstellers ‚Kipp und Zonen‘

Der Strahlungswert der Globalstrahlung ( $E_{\downarrow Solar}$ ) kann mithilfe des hier verwendeten Pyranometers auf zwei Arten bestimmt werden [[140] Kipp/Zonen 2012]. Das Ausgangssignal ( $U_{emf}$ ) des Pyranometers wird durch dessen Empfindlichkeitswert (*Sensitivity*) dividiert; 2) Der Spannungswert wird mit dem Empfindlichkeitskehrwert (Kalibrierfaktor) multipliziert. Für die Berechnung der Strahlung  $E_{\downarrow Solar}$  wurde bei den Experimenten Berechnungsformel 1) herangezogen:

$$E_{\downarrow Solar} = \frac{U_{emf}}{Sensitivity} \quad (6.3)$$

$E_{\downarrow Solar}$	= Globalstrahlung	(W/m <sup>2</sup> )
$U_{emf}$	= Pyranometerausgang	( $\mu$ V)
<i>Sensitivity</i>	= Empfindlichkeitswert	( $\mu$ V/W/m <sup>2</sup> )

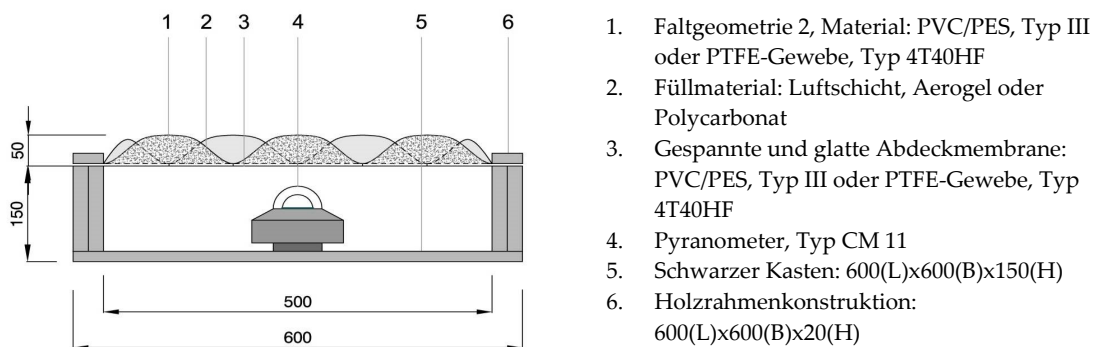
### 6.3.2 Diskussion der Messergebnisse

Tab. 6.2. fasst die Messergebnisse zur solaren Transmission der untersuchten, befüllten Faltstrukturen zusammen. Die Messungen sind am 07.03.2013 zwischen 12:10 und 12:30 Uhr bei wolkenlosem Himmel auf der Forschungsplattform des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart durchgeführt worden. Das Pyranometer wurde gemäß Herstellerangaben in einem schwarzen Kasten der Größe 600 x 600 x 100 mm montiert. Zu Beginn der Untersuchung wurde die eintreffende globale Sonneneinstrahlung erfasst. Die Faltproben wurden unmittelbar im Anschluss daran in einen Rahmen der Größe 600 x 600 x 50 mm horizontal eingelegt, um die hinter der Faltprobe auftreffende Strahlungsflussdichte zu ermitteln. Als Referenz wurde die Lichttransmission eines einlagigen und glatten PTFE-Gewebes bestimmt (TENARA-Gewebe 4T40HF). Mit einem Transluzenzwert von 38,24% entsprach die Messung nahezu exakt der Herstellerangabe von 38%. Die Proben wurden in derselben Reihenfolge getestet, wie sie in Tab. 6.2. vorkommt (von oben nach unten lesend).

Probekörper	Spektralbereich 310 - 2.800 nm		Solare Transmission
	Strahlungsflussdichte der Sonne	Strahlungsflussdichte hinter der Probe	
	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	%
<b>PTFE-Gewebe</b>			
<b>0 PTFE-Gewebe, 4T40HF</b> Referenzprobe: einlagig und glatt Flächengewicht: 1080 g/m <sup>2</sup>	579,3	221,5	38,2
<b>1.1 PTFE-Gewebe, 4T40HF</b> Füllung: Luftzwischen-schicht Flächengewicht: 3360 g/m <sup>2</sup>	577,5	112,8	19,5
<b>1.2 PTFE-Gewebe, 4T40HF</b> Füllung: Aerogel-Granulat Flächengewicht: 6650 g/m <sup>2</sup>	575,2	101,8	17,6
<b>1.3 PTFE-Gewebe, 4T40HF</b> Füllung: Polycarbonat-Granulat Flächengewicht: 36520 g/m <sup>2</sup>	588,5	29,6	5,0
<b>PES/PVC -Gewebe</b>			
<b>2.1 PES/PVC, Typ III</b> Füllung: Luftzwischen-schicht Flächengewicht: 3580 g/m <sup>2</sup>	581,8	14,1	2,4
<b>2.2 PES/PVC, Typ III</b> Füllung: Aerogel-Granulat Flächengewicht: 6870 g/m <sup>2</sup>	576,9	9,3	1,6
<b>2.3 PES/PVC, Typ III</b> Füllung: Polycarbonat-Granulat Flächengewicht: 36740 g/m <sup>2</sup>	581,4	5,2	0,8

**Tabelle 6.2** Gemessene solare Transmissionswerte der getesteten, befüllten Faltstrukturen aus PES/PVC- und PTFE-Gewebe

Bei sämtlichen getesteten Proben handelt es sich um einen zweilagigen Systemaufbau - entweder mit Aerogel- oder Polycarbonat-Granulat befüllt, oder unbefüllt, d.h. mit einer Luftzwischen­schicht. Die äußere Lage bildet stets die Faltstruktur des Probekörpers 2, d.h. Facettenfaltung mit punktuell und versetzt geraffter Struktur. Der Probekörper ist mit dem jeweiligen Granulat befüllt und mit einer inneren, glatten Abdecklage mittels Kabelbinder punktuell verbunden (siehe Abb. 6.5).



1. Faltgeometrie 2, Material: PVC/PES, Typ III oder PTFE-Gewebe, Typ 4T40HF
2. Füllmaterial: Luftschicht, Aerogel oder Polycarbonat
3. Gespannte und glatte Abdeckmembrane: PVC/PES, Typ III oder PTFE-Gewebe, Typ 4T40HF
4. Pyranometer, Typ CM 11
5. Schwarzer Kasten: 600(L)x600(B)x150(H)
6. Holzrahmenkonstruktion: 600(L)x600(B)x20(H)

**Abbildung 6.5** Schnitt des Probekörperaufbaus

Die Referenzmessung (0-PTFE-Gewebe) dient dem Nachweis der Richtigkeit der Messergebnisse. Probe 2.1 aus PTFE-Gewebe mit einer Luftzwischen­schicht erreicht einen solaren Transmissionswert von 19,53%. Probe 2.2 aus PTFE-Gewebe befüllt mit Aerogel-Granulat weist mit 17,69% ebenfalls sehr gute Transmissionswerte auf. Bei beiden Proben gelangt diffuses, blendungsarmes Licht hindurch, das vom Menschen üblicherweise als sehr angenehm wahrgenommen wird. Probe 2.3 aus PTFE-Gewebe befüllt mit Polycarbonat-Granulat erreicht hingegen mit 5,04% die schlechtesten solare Transmissionswerte aller Probekörper aus PTFE-Gewebe. Allerdings liegt selbst dieser Wert immer noch in einem akzeptablen Bereich, denn eine Membrandachfläche mit lediglich 5% Lichtdurchlässigkeit ist imstande, bei Tageslicht eine ausreichend helle Atmosphäre zu generieren, die den Einsatz von künstlichem Licht überflüssig macht [[108] Koch 2004]. D.h. bereits der den anderen Systemaufbauten aus PTFE-Gewebe unterlegende Aufbau der Probe 2.3 ermöglicht die Nutzung von Tageslicht. Das durch die Faltproben gefilterte Licht scheint diffus und trotz Faltstrukturen sehr gleichmäßig.

Die Untersuchungen der Proben aus PES/PVC-Gewebe haben solare Transmissionswerte von 2,43 bis 0,89% ergeben. Bei Probe 2.1 aus PES/PVC mit einer Luftzwischen­schicht ließ sich mit dem bloßen Auge gegen das Sonnenlicht geblickt ein Schimmern der Strahlen durch das Material erkennen. Die Kombination von

PES/PVC-Gewebe und Aerogel- bzw. Polycarbonat-Granulat mildert die Lichtdurchlässigkeit des gesamten Bauteils deutlich ab. So lässt sich bei Probe 2.3 aus PES/PVC-Gewebe mit dem bloßen Auge keine sichtbare Lichtdurchlässigkeit erkennen.

Insgesamt stützen die erzielten Messergebnisse die Intention, die textile Gebäudehülle mithilfe von Faltstrukturen zu einem anpassungsfähigen System auszubauen. Dies kann über den Systemaufbau, über die Strukturierung der Oberflächen, sowie durch die gezielte Wahl von lichtdurchlässigen und gleichzeitig gut dämmenden Materialien erfolgen. Das Befüllen der Faltstrukturen aus Fluorpolymerbeschichtetem PTFE-Gewebe mit transluzenten Funktionsmaterialien stellt einen Lösungsansatz dar, mit dem die schalldämmenden Eigenschaften verbessert und zugleich eine gute Lichtdurchlässigkeit der textilen Gebäudehülle gewährleistet werden können, ohne dabei die Leichtigkeit des Systemaufbaus zu beeinträchtigen. Der Systemaufbau der Probe 2.2 aus PTFE-Gewebe befüllt mit Aerogel-Granulat zeigt, dass Synergien zwischen der akustischen Wirkweise und einer hohen Lichtdurchlässigkeit erzielt werden können. Somit können sowohl Nutzung des Tageslichtes als auch ästhetische Gestaltungsspielräume gleichermaßen ermöglicht werden.

## **7 Neue Entwurfsansätze bei der Anwendung von Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle**

Neue Entwurfsansätze, die mit der Anwendung von Faltstrukturen in der textilen Gebäudehüllen einhergehen, bedingen die Erweiterung tradierter Entwurfsmethoden für das Entwerfen textiler Konstruktionen. Denn das Bauen mit Textilien wird bisher meist durch eine limitierte Architektursprache geprägt, deren Strukturform lediglich aus dem Kräfteverlauf resultiert. Die Textilien übernehmen dabei nicht nur die raumabschließende Funktion, sondern dienen gleichzeitig als Tragstruktur. Dadurch sind die architektonischen Möglichkeiten und die Ausbildung freier Formen und Flächen sehr begrenzt. Eine Trennung dieser beiden primären Funktionen ermöglicht dagegen eine neue architektonische Formensprache für die Textile Architektur – mit gänzlich neuen Artikulationsformen der Gebäudehülle.

Die Generierung von Faltstrukturen kann zur Verbesserung funktionaler Leistungseigenschaften einer Gebäudehülle bei gleichzeitiger Erhaltung ihrer ästhetischen Qualitäten beitragen. Diese Dualität, die aus der Verschmelzung von Ästhetik und Funktionalität im Sinne einer neuen Falt-Ornamentik resultiert, bereichert die architektonische Sprache textiler Gebäudehüllen. Sie lässt neue Gestaltungselemente zu, die materialimmanente Eigenschaften wie das Weiche, das Gefaltete und das Anschmiegsame zusätzlich hervorheben. Besonderes Augenmerk bei der Flächenkomposition muss dabei auf der Dimensionierung der Faltstrukturen liegen. Ihre Wahrnehmung wird durch das Zusammenwirken vieler Faktoren wie Lichtdurchlässigkeit, Strukturform, Strukturgröße, Betrachtungsentfernung etc. beeinflusst. Daher ist es im Entwurfsprozess entscheidend, die Faltstruktur in einem Maßstab zu vermitteln, der das Verhältnis von der Individualität des Einzelnen zum Ganzen berücksichtigt.

### **7.1 Erweiterung tradierter Entwurfsmethoden**

Das Bauen mit Textilien bildet einen Sonderbereich im Leichtbau, dessen Entwicklung in der Architektur und insbesondere im Bauingenieurwesen verstärkt in den 1950er Jahren begann. Textile Konstruktionen benötigen ein weitaus komplexeres Vorgehen bei der Form- und Gestaltfindung im Vergleich zu konventionellen Bauweisen, denn ihr Tragverhalten basiert ausschließlich auf Zugkräften. Das Textil wird dabei als raumabschließende Hülle und tragende Struktur zugleich verwendet, wodurch die architektonischen Möglichkeiten, die textile Oberfläche zu gestalten, nur sehr eingeschränkt gegeben sind. Nur durch die Trennung der Hüll- von der Tragfunktion lassen sich Gebäudehüllen entwerfen, welche zugleich die geforderten Funktionen erfüllen und die architektonische Erfahrung bereichern können – letzteres basierend auf den materialimmanenten Eigenschaften von Textilien, die

zu ihrer Schönheit, Sinnlichkeit und Sinnhaftigkeit führen. Die Erzeugung von Faltstrukturen führt zu visuell und haptisch erlebbaren Oberflächen. Gleichzeitig lassen sich die dreidimensionalen Strukturen für die Optimierung der technisch-funktionalen Eigenschaften der Gebäudehülle gut nutzen. Letztlich führt beides zusammen zu einer stark geänderten Bedeutung und Anwendbarkeit der textilen Gebäudehülle in der Architektur.

### 7.1.1 Entkopplung der Hüll- von der Tragfunktion

Mitte der 1950er Jahre erlangten textile Konstruktionen große Aufmerksamkeit in der Architektur. Die Arbeiten von Frei Otto haben hierzu wesentlich beigetragen. Einhergehend mit seiner Dissertation „*Das hängende Dach*“ [[144] Otto 1954] begann eine neue Ära leichter und weitgespannter Flächentragwerke, die auf Großbauten wie Weltausstellungen, Sportstätten, Freilichttheater usw. übertragen wurden und als textile Konstruktionen erstmals im Bereich der Architektur Dauerhaftigkeit beanspruchten. Maßgeblich ermöglicht wurde dies durch die rasante Entwicklung im Bereich der Kunststofftechnik zur damaligen Zeit (v.a. synthetisch hergestellte Fasern und fortgeschrittene Veredelungstechnologien für Gewebe [[113] Krüger 2006]). Die damals neuen, leistungsfähigen Materialien ermöglichten eine gute Dauerhaftigkeit und verfügten über hohe Festigkeiten. Textilien eigneten sich damit erstmals für weitgespannte Konstruktionen, bei denen der (textile) Werkstoff nicht nur eine hüllende Funktion übernehmen, sondern gleichzeitig auch als tragende Struktur dienen muss. Daraus entwickelte sich eine eigenständige architektonische Formensprache, die sich durch gewisse Einfachheit und Eleganz auszeichnet, jedoch nicht aus reinem Gestaltungswillen heraus entstand, sondern aus geometrischen Randbedingungen und Spannungszuständen generiert wurde.

Die Suche nach der „*richtigen*“ Form, die eine Gleichgewichtsfigur aus äußeren Lasten, inneren Kräften, sowie Randbedingungen wie bspw. Hoch- und Tiefpunkte und Art der Berandung bildet, wird als Formfindungsprozess bezeichnet. Dieser Prozess subsumiert tradierte Entwurfsmethoden, welche in der ersten Entwurfsphase auf experimentellen Untersuchungen basieren. Dabei wird die tragende Struktur einer Konstruktion mithilfe eines Modells (Seifenhautmodell, Stumpfstoffmodell, Hängemodell, pneumatisch gebildetes Modell etc.) bei gleichzeitiger Betrachtung von Maßstab- und Modelleffekten entwickelt. In der zweiten Entwurfsphase werden experimentelle Formfindungsmethoden durch computergestützte, mathematisch-numerische Formfindungsmethoden abgelöst. Damit können die mechanischen Eigenschaften der Modellwerkstoffe gleich einbezogen werden, um die bisher rein experimentellen Ergebnisse präzisieren zu können. Die mathematisch-numerischen Formfindungsmethoden der zweiten Entwurfsphase lassen sich prinzipiell in indirekte und direkte Methoden einteilen. Die indirekten Methoden bzw. Deformationsmethoden stellen im Grunde eine numerische Simulation der

experimentellen Methoden dar. Mittels der direkten Methoden wird versucht, eine Form zu entwickeln, die bei den gegebenen geometrischen Randbedingungen und unter dem formbestimmenden Lastfall einen ganz bestimmten, vorgegebenen Spannungszustand besitzt [[145] Sobek 2007].

Ein weiteres, wichtiges Kriterium bei der statischen Berechnung im Entwurfsprozess ist neben der Spannungsanalyse die Untersuchung der Verformung. Die beim Bau eingebrachte Vorspannung der Membrane dient dazu, den äußeren Lasten mit vertretbarer Verformung Stand zu halten. Die Vorspannung muss hoch genug sein, um die Lasten ohne Faltenbildung abtragen zu können. Ist sie allerdings zu hoch, so baut sie sich durch zeit- und temperaturabhängige plastische Verformung (Kriechen) des Materials wieder ab. Ist die Vorspannung der Membrane zu klein gewählt, so wirkt sich dies negativ auf die aerodynamische Stabilität aus (Flattern) [[146] Bögle 2010]. Technisch gesehen bedeutet diese völlige Zugbeanspruchbarkeit des Materials, dass beim Entwurf eine unter Vorspannung stehende Flächenform so festzulegen ist, dass *„die Vorspannung an jeden Punkt des Tragwerks unter Einwirkung äußerer Lasten erhöht oder abgebaut werden kann, jedoch stets als ausschließliche Zugbeanspruchung vorliegen muss“* [[147] Sobek 1995]. Daher werden textile Bauten als doppelt gekrümmte Flächen ausgebildet, bei denen Flächenform und innerer Vorspannungszustand in einer komplexen Wechselbeziehung stehen. Es handelt sich dabei um eine durch Hoch- und Tiefpunkte bzw. Grate und Kehlen vorbestimmte Flächenform, die aus dünnwandigen, beschichteten oder unbeschichteten textilen Werkstoffen herbeigeführt wird.

Zur Fertigung der doppelt gekrümmten Flächen werden, ähnlich wie bei Kleidern, Schnittmuster erstellt, bei welchen die Flächen in einzelne Streifen (Zuschnittsbahnen) unterteilt werden, die anschließend in ebene Streifen abgewickelt werden. Um die zugbeanspruchte Konstruktion bauen zu können, muss die beim Formfindungsprozess ermittelte Geometrie (Sollgeometrie) für den gelegten Spannungszustand zunächst in eine spannungsfreie Form (Nullgeometrie) überführt werden. Diese mit dem Entspannungsvorgang einhergehende Geometrieänderung wird als Kompensation bezeichnet. Beim Übergang vom unbelasteten in den belasteten Zugspannungszustand wird das Material normalerweise gedehnt, indem die Konstruktion zu ihren Auflagern hingezogen, bzw. gegen diese verspannt wird [[145] Sobek 2007].

Alles zusammengenommen entsteht auf die bisher beschriebene Weise eine Textile Architektur, deren Formensprache aus der Geometrie des Kraftflusses resultiert und deren Oberflächen durch den Konfektionsgrad bestimmt sind. Möchte man jedoch die weitgehenden architektonischen Möglichkeiten, d.h. völlig freie Formen, beim Bauen mit Stoffen ausloten, so ist die Entkopplung der Hüll- von der Tragfunktion notwendig. Nur so entsteht die Möglichkeit der Neugestaltung bzw. Mo-

difikation textiler Oberflächen mittels eines präzise arrangierten Faltenwurfs, der nicht nur eine sinnliche Inszenierung der Oberfläche zulässt, sondern auch eine materialgerechte Implementierung weiterer Funktionsmaterialien erlaubt. Durch diese Verschmelzung von Ästhetik und Funktionalität kann das Bauen mit Stoff eine breite Akzeptanz in der Architektur erfahren.

Bei der Betrachtung der Ursprünge menschlicher Behausungen (Zelte der Nomaden) und deren Entwicklung lässt sich feststellen, dass die ursprünglichen Bauten aus den Grundelementen Tragestruktur und Hülle bestanden. Eine strenge Trennung dieser beiden übergeordneten Funktionen ist somit eine konsequente Vorgehensweise, die in der Architekturgeschichte schon immer verankert war. Bereits mit Beginn der Chicagoer Schule am Ende des 19. Jahrhunderts entstand die erste leichte, nichttragende Gebäudehülle. Die Entwicklung des Skelettbaus führte zur statisch-konstruktiven Entkopplung von Hülle und Tragstruktur und symbolisierte den effizienten Umgang mit den neuen Materialien wie Stahl, Gusseisen und Glas. Die klassische Moderne förderte die Entwicklung der gläsernen Haut, die als imaterialisierte „Grenze“ zwischen innen und außen vor die Konstruktion angebracht wird.

Das Prinzip, die Gebäudestruktur komplett mit Glas zu „verkleiden“, wurde von Mies van der Rohe konsequent verfolgt. Mit seinem Wettbewerbsbeitrag für ein Hochhaus in Berlin entwirft er im Jahr 1921 eine Vision, in der er die Glasfassade wie eine dünne Haut über die Konstruktion aus Stützen und Deckenscheiben überzieht. Mies spricht von „*Haut und Knochen-Architektur*“, in der streng unterschieden wird zwischen rein konstruktiven und bloß verkleideten Bauelementen [[148] Blaser 1986]. In der Postmoderne beziehen sich Gebäudehüllen wieder auf die Renaissance, indem sie als Kulissen bzw. Bühnenbilder vor die Hauptansicht eines Gebäudes gestellt werden. Heutzutage werden Gebäudehüllen zum Teil völlig vom Tragwerk gelöst und zu einer selbstständigen, skulpturalen Form mit einer zum Teil ikonografischen Bedeutung entwickelt. Mit dem technischen Fortschritt haben sich auch die Funktionen einer Gebäudehülle erweitert, die nun Energie absorbieren und verarbeiten, den Schall dämmen und gar Informationen transportieren kann. Ein theoretisches Konzept für eine schaltbare Gebäudehülle, bekannt auch als „*polyvalente Wand*“, entwickelte Mike Davis in den 1990er Jahren. Die Gebäudehülle setzt sich aus mehreren, Layer-artigen Funktionsschichten zusammen, die sich selbstständig je nach Erfordernis regulieren [[149] Davies/Rogers 1981].

### **7.1.2 Dualität mittels Faltstrukturen**

Textile Oberflächen mit einem präzise arrangierten Faltenwurf heben nicht nur die ästhetischen Qualitäten des Stoffes hervor, sondern ermöglichen zugleich eine (verbesserte) Integration weiterer Funktionen. Diese Dualität, die aus der Ver-

schmelzung von Ästhetik und Funktionalität im Sinne einer neuen „Ästhetik des Nützlichen“ [[5] Winkler 2010] resultiert, ist von enormer Bedeutung. Denn nur wenn die textile Gebäudehülle imstande ist, die funktionalen bzw. bauphysikalischen Anforderungen mit ästhetischen Zielen zu vereinen, erfährt das Bauen mit Stoff eine breite Akzeptanz und Anwendung in der Architektur. Die Verbesserung funktionaler Leistungseigenschaften einer Gebäudehülle geht hier einher mit der Umsetzung neuer Gestaltungselemente, welche die materialimmanenten Eigenschaften des Textils wie das Weiche, Gefaltete und Anschmiegsame zusätzlich hervorheben. D.h. trotz Einbindung hocheffizienter Funktionsmaterialien in die Hülle soll die innewohnende Leichtigkeit textiler Konstruktionen erhalten bleiben.

Eine Entkopplung der Hüll- von der Tragfunktion ist Voraussetzung für Dualität, denn nur durch die Modifikation der Oberflächen lassen sich weitere Funktionen materialgerecht implementieren. Nur so können textile Gebäudehüllen ihre materielle Authentizität bewahren und die an Gebäudehüllen gestellten bauphysikalischen Anforderungen bspw. hinsichtlich Schallschutz und Lichtdurchlässigkeit erfüllen. Die Entbindung der textilen Außenhaut von ihrer statischen Funktion führt beinahe zwangsläufig dazu, ihre Oberflächen neu zu gestalten.

Durch Generierung von Faltstrukturen entstehen Oberflächen bzw. dreidimensionale Strukturen, die einerseits visuell und haptisch erlebbar sind und sich andererseits für technisch-funktionale Zwecke gut nutzen lassen. Gewöhnlich bedürfen Systemaufbauten, in welchen harte und weiche oder leichte und schwere Werkstoffe aufeinandertreffen, aufgrund dieser Materialzusammenführung besonderer Konstruktionsformen. Die Anwendung von Faltstrukturen bietet jedoch eine hervorragende Möglichkeit, solche Systemaufbauten ohne weiteres zu generieren. Ein typisches Merkmal von Faltstrukturen, das hierfür mitentscheidend ist, ist ihre differenzierte Oberflächenstruktur an der Vorderseite und Rückseite. Diese doppelte „Gesichtshaftigkeit“ der Oberfläche kann zum einen in technisch-funktionaler Hinsicht ausgenutzt werden, indem an der Rückseite beispielweise die Anbindung an die Tragstruktur erfolgt und/oder effiziente Funktionsmaterialien implementiert werden. Zum anderen entsteht an der Vorderseite der Faltstrukturen ein fugenloses Erscheinungsbild, das je nach Einfall der Sonnenstrahlen unterschiedliche Schattmuster und so eine belebende und ornamentale Wirkung erzeugt.

Im Rahmen der Laborversuche zur Bestimmung des bewerteten Schalldämmmaßes in Kap. 5 konnten die geeigneten Funktionsmaterialien trotz materialspezifischer Herausforderungen im Ergebnis reibungslos in die Probekörper integriert werden. Dabei konnten die befüllten Faltstrukturen schon bei kleinem Flächengewicht und geringer Systemaufbaudicke gute schalldämmende Wirkung erzielen. Die anschließenden Experimente zur Ermittlung der Lichttransmissionswerte in Kap. 6 konnte zeigen, dass die schalldämmenden Eigenschaften verbessert und

zugleich eine gute Lichtdurchlässigkeit der textilen Gebäudehülle gewährleistet werden kann, ohne dabei die Leichtigkeit des Systemaufbaus zu beeinträchtigen. Alle untersuchten Faltstrukturen haben zugleich eine starke, eigenständige Gestalt. Die den Probekörpern zugrundeliegenden Gestaltungsstudien in Kap. 4 demonstrieren, dass mittels Faltenbildung das ästhetische Potenzial eines Textils entscheidend gesteigert werden kann, ohne dass es eines komplizierten Konstruktionsverfahrens bedarf. Die Faltenerzeugung verleiht der Oberfläche eine eigene materielle Präsenz und ermöglicht zugleich die Integration funktionaler Elemente.

Gert de Bruyn nimmt den Bezug zur Sphäre des Theaters und beschreibt die Gebäudehülle als diejenige, die dem Gebäude ihre Funktion vorschreibt. Fassaden werden demnach nicht *„im Nachhinein einem Gebäude aufgesetzt, um es ansehnlich zu machen“*, sondern Gebäude werden *„in Funktion von Fassaden“* so wie *„Handlungen in Funktion von Rollen entworfen“* [[150] De Bruyn 2005]. Ornamentale Oberflächen so de Bruyn, können *„einen Text schreiben, der den öffentlichen Raum [zu] konstruieren hilft. Einige ambitionierte Architekten haben es längst erkannt, dass ihren Gebäuden ein wenig Maskerade und Faschingslaune gut steht. Und viel wichtiger noch: Es kommt sogar gut an.“* [[150] De Bruyn 2005]. Beide Aussagen im Zusammenspiel münden in der Dualität der Gebäudehülle. Der Architekt ist einem Regisseur vergleichbar, der seine Protagonisten – technische Konstruktion, Raum, Fassade – und deren Requisiten – Material, Struktur, Textur, Farbe, etc. – in einem Prozess so zusammenfügt, dass sie Aufsehen und Faszination beim Publikum erregen und dieses zum Nachdenken anregen [[48] Caspary 2013]

Betrachtet man Dualität in Hinblick auf Nachhaltigkeit, so ist der Lebenszyklus von Gebäudestrukturen und damit die darin enthaltene graue Energie verbauter Baustoffe entscheidend. Nachhaltigkeit bedeutet auch, die langanhaltende Gebrauchsgüte eines Produkts beständig nutzen zu wollen, bzw. bekannte Aufbausysteme immer wieder in einem Projekt einzusetzen. Wertverlust geschieht heutzutage weniger durch Verschleiß, sondern vielmehr durch den Verlust von Attraktivität und des technischen Vorsprungs vor anderen Produkten bzw. Systemen. Nichts desto trotz gibt es Produkte, die zeitlos sind und ihre Wertigkeit nicht verlieren. Hierzu gehört beispielweise das von Fritz Haller entwickelte USM Möbelsystem, das nachhaltig Funktion und Design verbindet [[151] Yordanova/Endres 2014]. Diesen engen Zusammenhang zwischen Schönheit, Nützlichkeit und der Dauerhaftigkeit sieht auch der französische Philosoph Paul Valéry (1871-1945): *„Nur was schön und nützlich ist, kann auch von Dauer sein, oder umgekehrt, einem Ding, das nicht von Dauer ist, mangelt es an Schönheit und Nützlichkeit“* [[152] Lederer 2016]. Damit textile Gebäudehüllen nicht weiterhin als temporäre Lösungen in der Architektur gesehen werden, muss diese Dualität – schön und nützlich zugleich sein – sichergestellt sein.

## 7.2 Emanzipation der Oberfläche

Dualität, die aus der Verschmelzung von Ästhetik und Funktionalität resultiert, bereichert die architektonische Sprache textiler Gebäudehüllen im Sinne einer neuen Falt-Ornamentik. Sie lässt neue Gestaltungselemente zu, welche die materialimmanenten Eigenschaften des Textils zusätzlich hervorheben. Man spricht in der Fachliteratur von Emanzipierung der architektonischen Oberfläche, die nicht mehr nur die technischen und funktionalen Aspekte zu erfüllen hat, sondern eine sinnliche Inszenierung der Oberfläche zulässt. Dabei geht es sich nicht um die Art der Ornamentierung, die Adolf Loos in seinem Vortrag „*Ornament und Verbrechen*“ kritisierte und als Zeichen der Degeneration bezeichnete [[45] Loos 1988]. Es geht vielmehr um eine neue Wertschätzung der Oberfläche – um materielle Authentizität und Präsenz, um eine Kunst der Gestaltung, bei der die Formvielfalt aus dem Material selbst heraus und nicht durch oberflächigen Dekor entwickelt wird [[153] Schittich 2006]. Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle bieten Lösungen, wie Baustoff, Struktur und Textur zu einer Einheit werden können. Dabei wird der ästhetische Ausdruck gefalteter Gebäudehüllen zum größten Teil durch die Komposition der Strukturform, die materialspezifischen Eigenschaften wie z.B. Lichtdurchlässigkeit, sowie durch die Maßstäblichkeit bzw. Dimensionierung der Faltstrukturen beeinflusst.

### 7.2.1 Ornamentierung

Bei kritischer Betrachtung herkömmlicher textiler Bauwerke muss man feststellen, dass deren gespannte und monochrome Oberflächen meistens nur durch gezieltes Setzen der Nähte gegliedert bzw. gestaltet sind. Die Nähte zeichnen sich bei einer transluzenten Membranoberfläche als dunkle Linien ab und geben dem Bauwerk eine zusätzliche Strukturierung. Sie machen den Kraftfluss zu den Hochpunkten und den seitlichen Abspannungen hin sichtbar, wodurch die Oberfläche eine gewisse Maßstäblichkeit und Rhythmisierung erlangt. Weitere ästhetisch motivierte Eingriffe zur Oberflächengestaltung sind meistens nicht vorzufinden. Die Ästhetik muss hier offensichtlich dem Ringen um die Findung und Beherrschung der Flächenform selbst weichen.

Dagegen wird bei der Anwendung von Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle das Falt-Ornament in erster Linie als verzierende Maßnahme wahrgenommen. Es akzentuiert und steigert die ästhetische Wirkung des Stoffes, es gliedert und belebt die Oberfläche. Gleichzeitig wird die Oberfläche durch das Falt-Ornament um eine taktil erlebbare Komponente erweitert. Kein anderes Material in der Architektur ist so vielseitig anwendbar wie Textilien. Adolf Loos schreibt in [[3] Loos, A., 1898]: „*Mit Hilfe der Materialien will der Architekt Gefühle in Menschen erzeugen, die eigentlich diesen Materialien noch nicht innewohnten*“. Jeder Baustoff, möchte er damit sagen, weckt im Menschen gewisse Assoziationen, die seiner Herkunft, Kulturgeschichte

und Erfahrungen entsprechen. Denn das Gebäude wird über das Material und seine Oberfläche wahrgenommen. Auch wenn Gebäudeoberflächen selten direkt berührt werden oder gar geruchlich oder akustisch auf den Menschen wirken, so ist der Eindruck des Menschen von Gebäuden (auch) durch taktile Eindrücke geprägt. Nach Martin Grunwald, Leiter des Haptik-Forschungslabors an der Universität Leipzig, ist „Haptik [...] das größte Fenster unseres Gehirns in die Welt [...] Form, Gewicht, Größe, Beschaffenheit, Struktur, eine Vielzahl elementarer Informationen über Dinge und Sachen erhalten wir nur, wenn wir sie anfassen. Berührungsreize sind elementar, für das, was Menschen ausmacht“ [[154] Ohlhauser 2013].

Die Erzeugung von Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle ist eine Technik der Transformation und Strategie der Gestaltung, bei der die Oberfläche an materieller Präsenz gewinnt. Die Gestaltungsstudien in Kap. 4 präsentieren das performative Potential textiler Werkstoffe, wobei sie nur ein kleines Spektrum an potentiell möglichen Falt-Ornamenten abdecken. Grundsätzlich bilden textile Faltstrukturen flächenhafte Formgebilde, die aus repetitiven, einfachen geometrischen Grundformen bestehen. Schon seit der Antike werden diesen Grundformen gewisse semantische Bedeutungen zugeordnet. So werden z.B. dreieckförmige Strukturen als wandelbar, spannungsvoll, konstruktiv und problematisch betrachtet. Quadratische Formen werden dagegen als männlich, hart, bestimmt, verstandesbetont interpretiert. Kreisförmige Grundformen gelten wiederum als weiblich, weich, unbestimmt, gefühlsbetont [[155] Gleiniger/Vrachliotis 2009]. Die flächenhaften Formgebilde werden zum überwiegenden Teil durch die Konturen der Formen, sowie durch ihre konkaven und konvexen Verläufe definiert, die eine räumliche Wirkung der Oberfläche erzeugen. Die Gestaltungsinstrumente beim Prozess der Transformation sind *Symmetrie*, *Rapport*, *Textur*, *Rhythmus* und *Dynamik* [[155] Gleiniger/Vrachliotis 2009].

Gefaltete Strukturen zeichnen sich aus durch eine regelmäßige *Symmetrie* bzw. Wiederholung der gleichen Formelemente mittels Reihung, Rotation oder spiegelbildlicher Anordnung, die gleichzeitig eine harmonische Bildkomposition erzeugt. *Symmetrie* strahlt Strenge, Klarheit und Ruhe aus, und ist leicht zu erfassen. Der *Rapport* ist dabei die kleinste abgeschlossene Einheit eines Musters bzw. einer Faltung. Er gibt an, in welchem Abstand sich die Einheit auf der Oberfläche wiederholt. Die Rapportgröße wird durch Rapportbreite und Rapporthöhe definiert [[156] Klein 2008].

Diverse Faltstrukturen wie z.B. geraffte Facettenfaltungen unterliegen einem Ordnungsprinzip, das von einem orthogonalen Raster ausgeht und ein normgebundenes System darstellt. In der Regel unterscheidet man zwischen Flächenstrukturen, die optisch zu erfassen sind, und greifbaren Strukturen, die durch Materialmodifikation erzeugt werden. Die dreidimensionale Strukturierung generiert eine Rau-

heit, die als taktile Eigenschaft der Oberfläche bewertet wird. Die visuell erlebbare Oberflächenbeschaffenheit aus Linien und Mustern definiert die *Textur*. Ihre Merkmale sind Linienartigkeit, Regelmäßigkeit und Gerichtetheit [[156] Klein 2008].

Oberflächentexturen können mittels Kontrastierung wirksamer gestaltet werden. Kontraste können dabei als Formkontraste, Oberflächenkontraste oder Farbkontraste ausgebildet werden. Insbesondere bei Faltstrukturen, die in der Tiefe stark strukturiert sind, treten im Ergebnis starke Veränderungen der Lichtsituation an der Oberfläche auf. Den Grad der Wirkung bestimmt dabei die Größe der Polarität, die wiederum mit dem rhythmischen Aufbau der Faltungen zusammenhängt. Der *Rhythmus* entsteht durch die gesetzmäßige Wiederholung der Brüche einer Faltenfolge oder durch Variieren des Abstands zwischen den Brüchen einer oder mehrerer Faltenfolge(n). Faltenrhythmen können auch um unterschiedliche Kombinationen innerhalb eines Rappports erweitert werden.

Die *Dynamik* einer Faltstruktur wird als das Bewegungsempfinden definiert, welches beispielweise durch eine spannungsvolle Anordnung der Struktur oder durch Differenzierung der Strukturgröße auf der Grundfläche erzeugt werden kann. Unterschiedliche Variationen werden durch Verdichtung oder Auflösung der Strukturen stufenweise oder fließend generiert. Je differenzierter die Faltstrukturen, desto zurückhaltender und leiser wird die Dynamik gehalten [[155] Gleiniger/Vrachliotis 2009].

Die Gestaltungsinstrumente *Symmetrie*, *Rapport*, *Textur*, *Rhythmus* und *Dynamik* spielen bei der Faltenbildung eine entscheidende Rolle. Mittels deren gezielter Anwendung lassen sich bei den Prozessen der Transformation bspw. bestimmte Merkmale der Oberfläche hervorheben. Das Gestaltungsinstrumentarium adressiert soweit die räumliche Wirkung von Oberflächen. Es wird komplettiert durch die *Farbe*. Die farbige Erscheinung ist eine Sinnesempfindung, durch welche allein zwei Oberflächen absolut gleicher Größe, gleicher Form, gleicher Struktur und gleichen Glanzgrades vom Betrachter anders wahrgenommen werden. Bei der Gestaltung kann Farbe daher bspw. der Intensivierung der Formwirkung dienen. Die scheinbare Farbe einer Fläche, die Licht reflektiert, wird durch die spektrale Zusammensetzung des Lichts, von dem sie beleuchtet wird, sowie von den spektralen Reflexionseigenschaften der Fläche bestimmt [[157] Schlegel 2006]. Aufgrund verschiedener Bereiche der Farbwahrnehmung (physikalisch, visuell, physiologisch/psychologisch) ist die Wahrnehmungsfähigkeit des Betrachters von Farbe jedoch sehr subjektiv und hängt von vielen Faktoren ab wie bspw. vom Alter des Betrachters. Insofern lassen sich an dieser Stelle keine kollektiv übergeordneten Bedeutungsmuster formulieren.

### 7.2.2 Maßstäblichkeit

Während eine glatte Fassade maßstabslos wirken kann, prägen Falt-Ornamente in der Gebäudehülle wesentlich die Proportion, Gliederung und Maßstäblichkeit eines Gebäudes, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der Umgebung des Gebäudes stehen. Eine deutliche, aber vermittelnde Kontrastierung zur Umgebung wird im Allgemeinen als eigenständig und positiv empfunden, während ein zu starker Kontrast zur Umgebung als störend registriert wird. Eine völlige Anpassung an die Nachbarschaft kann wiederum als formale Ratlosigkeit interpretiert werden und zu einer Störung der ursprünglich geplanten Wirkung führen, was das Gebäude schlimmstenfalls als Karikatur seiner Umgebung erscheinen lässt [[158] Heilmann 2007]. Insofern sollte bei der Flächenkomposition besonderes Augenmerk auf der Dimensionierung der Faltstrukturen liegen. Das Ziel ist es, die Faltstruktur in einem Maßstab zu vermitteln, der das Verhältnis von der Individualität des Einzelnen zum Ganzen berücksichtigt.

Im Wesentlichen wird die Maßstäblichkeit eines Gebäudes, besonders in geschlossener Bebauung, durch seine Fassadenproportionen und -dimensionen determiniert. Die Proportion einer Fassade wird bestimmt durch das Verhältnis von Breite zu Höhe der Außenwand. Eine Fassade lässt sich grundsätzlich in horizontale und vertikale Elemente gliedern, welchen meist ein Raster unterliegt. Die Dimensionen der einzelnen Fassadenelemente folgen in der Regel Proportionsvorgaben, die sich an der menschlichen Anatomie orientieren. Daher sind für die Maßstäblichkeit von Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle grundlegende Kenntnisse über die visuelle Wahrnehmung von Strukturen unverzichtbar.

Die optische Wirkung von Faltstrukturen in der Gebäudehülle wird zum größten Teil über die Strukturgröße (Länge, Breite, Höhe, Tiefe) bestimmt. Für den Betrachter ist die (scheinbare) Strukturgröße jedoch abhängig vom Betrachtungsabstand bzw. von der Position des Betrachters. Gewünschte architektonische Oberflächeneffekte lassen sich daher nur erzielen, wenn von der scheinbaren Strukturgröße ausgegangen wird, die je nach Ferne, Blickwinkel und Lichteinfall Faltstrukturen in der Gebäudehülle als quasi homogene Oberflächen, filigrane pixelhafte Strukturierungen der Fläche etc. erscheinen lässt.

Bilder bzw. Strukturen, die das menschliche Auge mit seinen ca. 130 Millionen Rezeptoren erfasst, werden in Abhängigkeit vom Betrachtungsabstand aufgelöst. Das Auflösungsvermögen des normalsichtigen Auges wird mit dem Normwert einer Bogenminute (1/60 Grad) definiert. Die Bogenminute beschreibt die Fähigkeit, einzelne Pixel noch als Punkte wahrnehmen zu können. Ab einem gewissen Betrachtungsabstand verschwimmen diese Punkte zu einer Fläche. Das Auflösungsvermögen des bloßen Auges beträgt unter idealen Bedingungen in etwa 0,5 bis 1,0 Bo-

genminuten, was einem Millimeter auf 3 bis 6 Meter entspricht [[159] Harry 2003]. Damit ist das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges bei einem Meter Betrachtungsabstand mit rund 76 ppi (pixel per inch) ausgereizt.

Die scheinbare Größe eines Objektes wird in Abhängigkeit von der wirklichen Objektgröße und dem Betrachtungsabstand wahrgenommen und mithilfe des sog. Sehwinkels definiert. Der Sehwinkel eines Objektes ist der Winkel, unter dem ein Abbild auf der Netzhaut aufgefasst wird. Der mathematische Zusammenhang zwischen der scheinbaren Größe ( $\alpha$ ), der Entfernung ( $r$ ), und der wahren Größe ( $g$ ) lässt sich mit Hilfe des Emmertschen Gesetzes ableiten. Nach diesem Gesetz ist die Größe, die man bei gegebenem Netzhautbild für einen bestimmten Sehwinkel wahrnimmt, direkt proportional zur wahrgenommenen Entfernung [[160] Rock, I., 1985]]. Die scheinbare Objektgröße lässt sich mit der folgenden Formel ermitteln [[161] Szczypek 2011]

$$g = 2r \cdot \tan(\alpha/2) \quad r = g / (2 \cdot \tan(\alpha/2)) \quad \alpha = 2 \cdot \arctan(g/(2r))$$

$g$  = wahre Größe

$r$  = Entfernung

$\alpha$  = scheinbare Größe oder Sehwinkel

Beispielsweise hat der Mond mit seiner ungefähren wahren Größe (Durchmesser) von 3500 km ( $g$ ) und der Entfernung von 400.000 km ( $r$ ) eine scheinbare Größe von etwa 0,5 Grad ( $\alpha$ ) [[159] Harry 2003]. Ebenso gut lässt sich mit dieser Formel die scheinbare Größe von Faltstrukturen in der Gebäudehülle in Abhängigkeit von der wirklichen Objektgröße und dem Betrachtungsabstand rechnerisch ermitteln. Mit dem Ergebnis lässt sich im Entwurfsprozess die Größe der Faltstrukturen sinnvoll bewerten und grafisch überprüfen.

Als Beispiel zur Veranschaulichung soll an dieser Stelle eine parallele Längsfaltung mit einem Faltkantenabstand von 22,50 cm dienen, deren Merkmalausprägungen in Abb. 7.1 dargestellt sind. Sie ist vergleichbar mit der Faltstruktur von Probe 2 aus Kap. 5 und basiert auf demselben Faltraster von 5,00 x 5,00 cm.

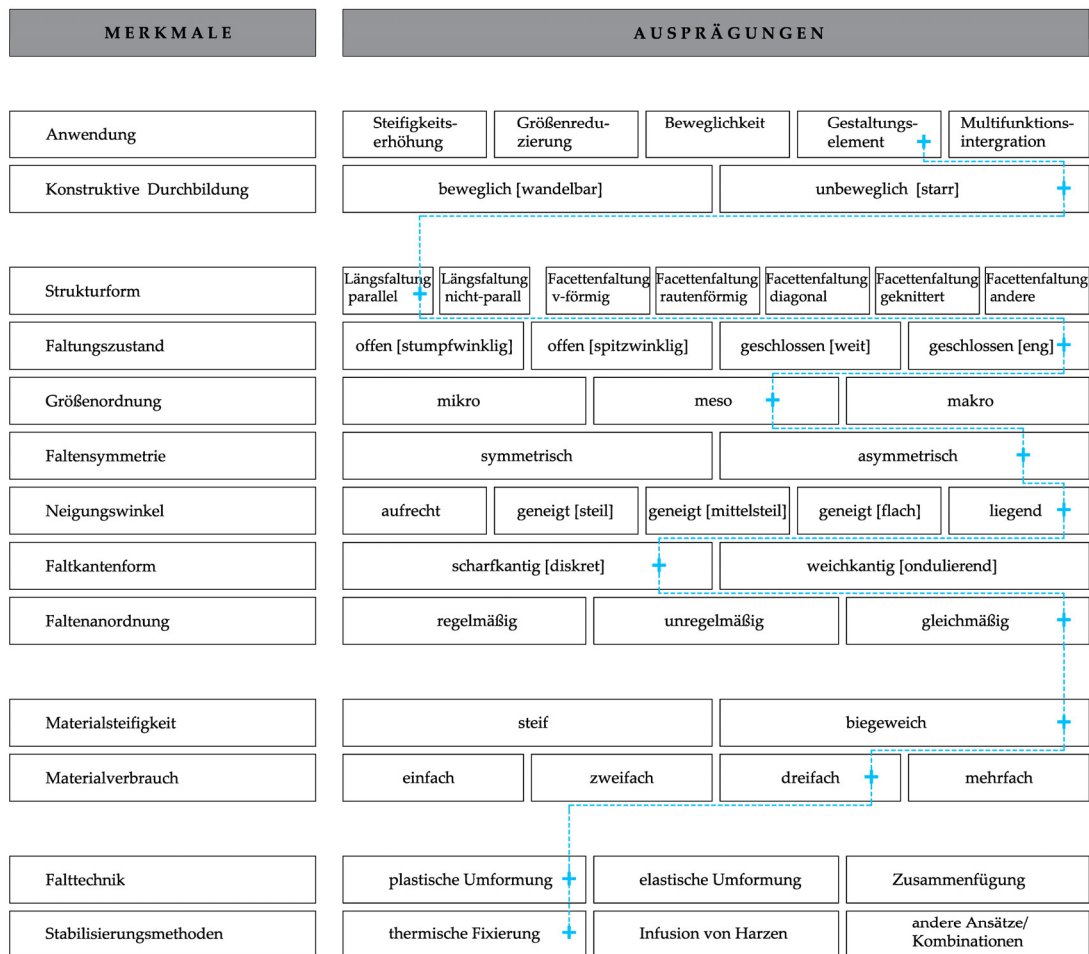


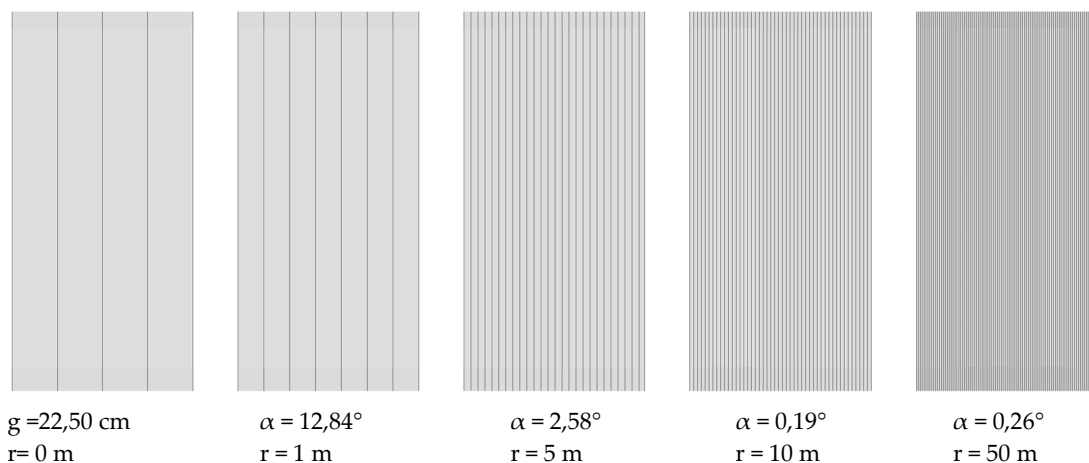
Abbildung 7.1 Einordnung der gewählten Faltstruktur im Morphologischen Kasten

Als Betrachtungsentfernung wurde die Fußgängerperspektive mit mehreren Stufen der Entfernung angenommen. Die gewählten Abstände von 1, 5, 10, 50 und 100 m gelten als übliche und nutzungsbedingte Betrachtungsabstände für das Betrachtungsobjekt Fassade [[162] Müller/Schumann 2000]. 100 m und 50 m werden als Abstand für die Betrachtung der Gebäudehülle aus der Entfernung angenommen. Um den Gesamteindruck eines Bauwerkes zu erfassen, wird ein Betrachtungsabstand von 10 m gewählt. Eine Entfernung von 5m wird üblicherweise für die Betrachtung der Oberflächenstruktur oder Farbe angenommen. Für die Detailbewertung liegt der Betrachtungsabstand bei 1 m. Die Werte der scheinbaren Größe in Bezug zur Entfernung des Betrachters und zur faktischen Größe des Objekts sind Tab. 7.1 zu entnehmen. Sie gelten für eine Faltstruktur der Größe 22,50 cm, d.h. der Größenordnung „meso“ (Strukturen bis zu 1 m.).

Wahre Größe der Faltstruktur (g)	Betrachtungsentfernung (Fußgängerperspektive) (r)	Scheinbare Größe der Faltstruktur ( $\alpha$ )
22,50 cm	1 m	12,84°
	5 m	2,58°
	10 m	1,19°
	50	0,26°
	100	0,13°

**Tabelle 7.1** Berechnung der scheinbaren Größen in Abhängigkeit von der Betrachtungsentfernung für eine Faltstruktur der Größe 22,50 cm

Anhand der ermittelten Werte lässt sich feststellen, ab welchem Entfernungsabstand die Faltstruktur noch zu erkennen ist, bzw. ab welchem Entfernungsabstand sie nicht mehr zu sehen ist und stattdessen auf den Betrachter als eine homogene Fläche wirkt. Die grafische Darstellung der Werte in Abb.7.2 verdeutlicht, dass die scheinbare Strukturgröße schon bei einem Meter Entfernung um die Hälfte kleiner wird. Bis zu 10m Entfernung kann ein Betrachter die Struktur noch gut erkennen. Sie erscheint diesem immer noch als eine Struktur der Größenordnung „meso“. Ab einer Entfernung von 50 m wird die strukturierte Fläche dagegen zu einer nahezu homogenen Fläche. Sie erscheint dem Betrachter auch nicht mehr in ihrer wahren Größenordnung „meso“, sondern vielmehr als eine Mikro-Faltstruktur („mikro“ bezeichnet Faltstrukturgrößen bis 10 cm).



**Abbildung 7.2** Grafische Darstellung einer prallen Längsfaltung mit einem Faltenabstand von 22,50 cm und ihrer scheinbaren Größe ( $\alpha$ ) in Abhängigkeit vom Betrachtungsabstand (r) und ihrer wahren Größe (g)

Bei der Interpretation der scheinbaren Größe einer Faltstruktur muss man beachten, dass Betrachtung und Wahrnehmung Vorgänge darstellen, welche durch eine hohe Individualität und Subjektivität gekennzeichnet sind. Zudem ist die Wahrnehmungsfähigkeit eines Betrachters von seinem fachspezifischen Wissen, der Sen-

sitivität und seiner Grundeinstellung abhängig. Die Wirkung des individuell empfundenen Erscheinungsbildes wird durch

- objektabhängige Faktoren wie bspw. Farbe, Textur (Linienartigkeit, Regelmäßigkeit, Gerichtetheit), Gliederung im Fassadenraster, Proportionen in Bezug zu Gebäudekanten, sowie durch
- zusätzliche Faktoren wie Betrachtungswinkel, Betrachtungsgeschwindigkeit, Licht, Schatten, Wetterlage, Gebäudeensemble, etc.

bestimmt. Nichtsdestotrotz kann die dargestellte Methode zur Ermittlung der Wahrnehmungsgröße von Strukturen in Verbindung mit Materialkollagen und Prototypmustern im Maßstab 1:1 (Abb. 7.3) dem Architekten im Entwurfsprozess zur Orientierung bei der Analyse des Maßstabs von Faltstrukturen dienen.



**Abbildung 7.3** Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle / PVC-PES-Prototypenmuster im Maßstab 1:1

## 8 Kritische Würdigung und Ausblick

Die Erzeugung von Faltstrukturen bietet eine besonders vielversprechende Möglichkeit zur Gestaltung textiler Gebäudehüllen, wenn diese zu ästhetischen und funktionalen Qualitäten gleichermaßen beitragen sollen. Die vorliegende Arbeit zeigt auf, wie textile Oberflächen mithilfe von Faltstrukturen gestaltet werden können, wenn sie zu ästhetischen Qualitäten und zur Verbesserung der schalltechnischen Eigenschaften textiler Gebäudehüllen bei gleichzeitiger Erhaltung einer hohen Lichttransmission beitragen sollen. Die Arbeit blickt dabei über tradierte Entwurfsansätze hinaus. Da Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle wenig erforscht sind, adressiert die Arbeit dazu im Sinne der Explorativen Forschung die folgenden Forschungsfragen:

1. Wie können Faltungen phänomenologisch und architekturtheoretisch eingeordnet werden?
2. Wie können Faltstrukturen aus architektonischer Sicht systematisiert werden?
3. Welche Faltstrukturen lassen sich auf textile Werkstoffe in der Architektur und somit auf textile Gebäudehüllen übertragen?
4. Welche Faltstrukturen tragen zur Verbesserung der schalldämmenden Eigenschaften textiler Gebäudehüllen bei?
5. Inwieweit können Faltstrukturen schalltechnisch aktiviert werden, ohne dabei die Lichtdurchlässigkeit der Oberfläche zu beeinträchtigen?
6. Welche neuen Entwurfsansätze gehen einher mit der Anwendung von Faltstrukturen bei textilen Gebäudehüllen?

Aufgrund ihrer Relevanz für das Textile Bauen liegt der Ausgangspunkt für die phänomenologische Einordnung der Faltung in der Natur und Technik, wobei die Bionik als Bindeglied dient, sowie in der Mode, im Design und in der Kunst. Die herausgearbeiteten unterschiedlichen Faltprinzipien und ihre realen Anwendungen in diesen Bereichen sind potentiell auf das Bauwesen übertragbar. Im Bauwesen interessiert die Faltung zum einen aufgrund ihrer technisch-konstruktiven und zum anderen aufgrund ihrer räumlich-plastischen Wirkung. Reale „Meilensteine“ in beiderlei Hinsicht werden in der vorliegenden Arbeit herausgearbeitet, wobei zwischen starren und wandelbaren Faltstrukturen unterschieden wird. In der Architekturtheorie wird die Generierung von Faltstrukturen in der Gebäudehülle in erster Linie als eine verzierende Maßnahme wahrgenommen, die als Falt-Ornament bezeichnet werden kann. Eine solche Art der Oberflächengestaltung wurde in der Vergangenheit kritisch beurteilt, gar teilweise als illegitim bezeichnet. Ausgangspunkt der architek-

turtheoretischen Betrachtung in der vorliegenden Arbeit ist die Theorie der Bekleidung und des Ornaments von Semper, der die Möglichkeiten und Ausdrucksformen der architektonischen Oberflächengestaltung auf textile Eigenschaften und Gestaltungstechniken zurückführte. Des Weiteren wird auf die kritische Haltung zum Ornament von Loos, sowie auf die weitreichende Analyse der Mannigfaltigkeit der Falte von Deleuze eingegangen. Abschließend werden die zeitgenössischen Tendenzen in der Architekturtheorie herausgearbeitet und mit realen Beispielen unterlegt.

Um Faltstrukturen analysieren und ihre Anwendungsmöglichkeiten für das Textile Bauen entdecken zu können, ist ihre systematische Einordnung aus architektonischer Sicht notwendig. Eine ebensolche Systematisierung wird in der vorliegenden Arbeit in Form eines Morphologischen Kasten vorgestellt. Die relevanten Merkmale (incl. definierter Merkmalsausprägungen) werden dabei in vier Gruppen zusammengefasst: (1) Anwendung und konstruktive Durchbildung der Faltung, (2) geometrische Durchbildung im Hinblick auf die Anordnung der Faltkanten und Schnittpunkte (Strukturform), sowie im Hinblick auf die Anordnung der Faltflächen (Faltungszustand, Größenordnung der Faltstruktur, Faltensymmetrie, Neigungswinkel der Faltung, Faltkantenform, Faltenanordnung), (3) Materialeigenschaften und deren Verbrauch, (4) Falttechniken und Formstabilisierungsmethoden. Der Morphologische Kasten versteht sich als Gestaltungshilfe für die Textile Architektur, mit welcher insbesondere auch das enorme Spektrum an möglichen Faltungsformen in der textilen Gebäudehülle entdeckt und analysiert werden kann.

Die Arbeit präsentiert neun im Rahmen von experimentellen Gestaltungsstudien entstandene Faltstrukturen: fünf Facettenfaltungen mittels Raffung, zwei Facettenfaltung mittels Tessellation, sowie zwei Längsfaltungen mittels Trennen, Verformen und Zusammenfügen des Materials. Sie wurden allesamt prototypisch im Maßstab 1:1 umgesetzt und deuten das große Spektrum der möglichen Erscheinungsformen von Faltungen an, die sich auf textile Werkstoffe und somit auf technische Gewebe und textile Gebäudehüllen übertragen lassen. Im Hinblick auf den Herstellungsprozess der Faltung und ihre Applikation auf die textile Gebäudehülle lassen sich geraffte Facettenfaltungen und Längsfaltungen am einfachsten umsetzen. Geraffte Faltungen bilden zudem an der Rückseite meist dreidimensionale Strukturkammern, die sich mit geeigneten Funktionsmaterialien befüllen lassen. Diese Kombination funktionaler und ästhetischer Aspekte macht diese Faltungsart aus architektonischer Sicht äußerst interessant, denn nicht jede Faltstruktur lässt sich für technisch-funktionale Zwecke nutzen. Längsfaltungen wiederum verleihen der Oberfläche eine räumliche Tiefenwirkung, die spannungsvolle Lichtsituationen erscheinen lässt und zudem eine taktile Komponente hat, welche nur selten bei architektonisch gestalteten Flächen zur Geltung kommt. Facettenfaltungen mittels Tessellation verlangen

dem verwendeten Material dagegen eine gewisse Grundsteifigkeit ab, die aber u.a. durch eine entsprechende Beschichtung gewährleistet werden kann.

Im Rahmen der Arbeit wurde nur ein kleines Spektrum an möglichen Faltformen entwickelt und auf textile Werkstoffe übertragen. Die genutzten Faltechniken (Raffung, Tessellation, Zerschneiden und Zusammenfügen des Stoffes) bieten noch viel mehr Gestaltungsmöglichkeiten, die in zahlreichen weiteren, funktionell angepassten Faltstrukturen resultieren können. Die durchgeführten Gestaltungsstudien können dabei als Grundlage für weite Variationen bzw. für weitere Forschungsarbeiten dienen.

Die durchgeführten Messungen im Akustiklabor zeigen, dass die gewählten Oberflächenmodifikationen (zwei Facetten- und zwei Longitudinalfaltungen aus den o.g. Gestaltungsstudien) für sich genommen keinen nennenswerten Beitrag zur Verbesserung der Schalldämmung leisten. Die Strukturierung der Membranoberfläche in den gewählten Dimensionen leistet demnach trotz Massenerhöhung keinen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Schalldämmwerte. Facettierte Faltungen bieten jedoch die Möglichkeit, die Oberflächenstruktur zu befüllen und somit die akustischen Eigenschaften der Oberfläche zu aktivieren. Durch das Befüllen der Faltstrukturen mit Funktionsmaterialien wird die Masse der Fläche erhöht. Gleichzeitig können die Faltstrukturen damit stabilisiert werden. Die Verbesserung der Schalldämmwirkung ist auf die Erhöhung der Masse, wie auch auf die Kopplung der beiden Membranlagen zurückzuführen. Verglichen mit dem sehr schweren Polycarbonat-Granulat wirkt dabei das sehr leichte Silicat-Aerogel-Granulat besonders effizient. Die Untersuchungen ergaben, dass eine mit Silicat-Aerogel-Granulat befüllte Faltstruktur aus PTFE-Gewebe mit einem gesamten Flächengewicht von  $6,87 \text{ kg/m}^2$  ein Schalldämm-Maß von 24 dB erreicht.

Der gleiche Systemaufbau wies bei den durchgeführten solaren Transmissionsmessungen einen Transmissionswert von 17,7% auf, womit dieser (beispielhafte) Lösungsansatz weder die Lichtdurchlässigkeit, noch die Leichtigkeit des Systemaufbaus beeinträchtigt. Er zeigt vielmehr, dass Synergien zwischen der akustischen Wirkweise und einer hohen Lichtdurchlässigkeit erzielt werden können. Somit können sowohl Nutzung des Tageslichtes als auch ästhetische Gestaltungsspielräume gleichermaßen ermöglicht werden. Insgesamt stützen die erzielten Messergebnisse die Intention, die textile Gebäudehülle mithilfe von Faltstrukturen zu einem anpassungsfähigen System auszubauen.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung der schalldämmenden (und lichttechnischen) Wirkung von Faltstrukturen, die eine Strukturgröße von ca. 10-22,5 cm und eine Strukturtiefe von ca. 5-7,5 cm aufweisen. Eine weiterführende

Arbeit könnte andere bzw. größere Dimensionen untersuchen. Es stellt sich die Frage, wie sich die Größe der Faltstruktur auf die Streuung bzw. Diffraktion der Schallwellen auswirkt, sowie ob Strukturen mit scharf gekanteten Faltekanten eine bessere Wirkung und somit ein besseres Schalldämm-Maß erzielen. Des Weiteren wäre zu untersuchen, welche schallabsorbierenden Eigenschaften die Faltstrukturen aufweisen. Dies erfordert ein Messverfahren in einem Hallraum und deutlich größere Probekörper. Ebenso interessant wäre die Untersuchung von Faltstrukturen, die mit anderen als den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Funktionsmaterialien befüllt sind. Bei den Untersuchungen in dieser Arbeit wurden nur zwei Granulate, Silicat-Aerogel-Granulat und Polycarbonat-Granulat, verwendet. Es können jedoch auch andere, hocheffiziente Materialien in Frage kommen, die bspw. zusätzlich auch wärmedämmende Eigenschaften textiler Gebäudehüllen unterstützen. Ebenso ist ein anderer Substratzustand der Füllung denkbar.

Die Dualität, die aus der Verschmelzung von Ästhetik und Funktionalität resultiert und im Sinne einer neuen Falt-Ornamentik zu verstehen ist, bereichert die architektonische Sprache textiler Gebäudehüllen. Sie lässt neue Gestaltungselemente zu, die materialimmanente Eigenschaften wie das Weiche, das Gefaltete und das Anschmiegsame zusätzlich hervorheben. Voraussetzung für Dualität ist das Verlassen tradierter Entwurfsansätze: Dualität mittels Faltstrukturen bedingt die Entbindung der Hüll- von der Tragfunktion. Die mit der Dualität einhergehende Emanzipierung der architektonischen Oberfläche, die nicht mehr nur die technischen und funktionalen Aspekte zu erfüllen hat, sondern eine sinnliche Inszenierung der Oberfläche zulässt, bedingt wiederum ein besonderes Augenmerk auf die Dimensionierung von Faltstrukturen. Ihre Wahrnehmung wird durch das Zusammenwirken vieler Faktoren wie Lichtdurchlässigkeit, Strukturform, Strukturgröße, Betrachtungsentfernung etc. beeinflusst. Die Vermittlung der Faltstruktur in einem Maßstab, der das Verhältnis von der Individualität des Einzelnen zum Ganzen berücksichtigt, ist daher entscheidend.

## Literaturverzeichnis

- [1] Sobek, W.; Blaser, W.: *Ingenieurkunst*, Birkhäuser, Basel, 1999.
- [2] Semper, G.: *Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten, oder praktische Ästhetik. Ein Handbuch für Techniker, Künstler und Kunstfreunde*, Bd. 1., Friedrich Bruckmann's Verlag, München, 1860.
- [3] Loos, A.: Die alte und die neue Richtung in der Baukunst, *Die Neue Freie Presse*, 31/32 (1898) 12, 89-92.
- [4] Hegel, G.W.F.: *Vorlesung über die Ästhetik: Eine Auswahl*, ed. von Rot, Stuttgart, 1968.
- [5] Winkler M.: Die Ästhetik des Nützlichen in „Pfisters Mühle“, *Jahrbuch der Raabe-Gesellschaft*, Band 38, De Gruyter, 2010, 18-39.
- [6] Burg, J-P.: Einführung in die Strukturgeologie. Vorlesungsskriptum zum Grundkurs Strukturgeologie; Geologisches Institut, Arbeitsgruppe Strukturgeologie und Tektonik ETH Zürich, 2001.
- [7] Büchel, K.; Nachtigall, W.: *Das große Buch der Bionik: Neue Technologien nach dem Vorbild der Natur*, 2. Aufl., Deutsche Verlags-Anstalt (DVA), Stuttgart, 2000.
- [8] Archplus Autoren: Faltprinzipien, *Archplus*, 131 (1996), 85–95.
- [9] Hungerbühler, N.: Origami-von der Kunst und der Wissenschaft des Papierfaltens, Schriftenreihe zur Didaktik der Mathematik der Österreichischen Mathematischen Gesellschaft (ÖMG) 45 (2013), 1–14
- [10] Sauer, C.: *Mode of... Neue Materialien für Architektur und Design*, Gestalten, Berlin, 2010.
- [11] Klett, Y.: *Auslegung multifunktionaler isometrischer Faltstrukturen für den technischen Einsatz*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2013.
- [12] Mao, Y.: *Auswirkung unterschiedlicher Gewebefaltungen auf das Gefährdungspotenzial von Airbags*, Dissertation, Technische Universität, Berlin, 2001.
- [13] Schirbaum, W.: *Bekleidungs- Lexikon*, 3. Aufl., Schiele & Schön, München, 1993, 319.
- [14] Lassner, E.: *Plissee Geschichte*,  
<http://www.lassnerplissee.de/Geschichte/geschichte.html>, [Aufruf: 03.01.2013].

- [15] Loschek, J.: *Modedesigner: ein Lexikon von Armani bis Yamamoto*. 3. Aufl., Verlag C.H. Beck OHG, München, 2007, 79–81.
- [16] Mears, P.: *Madame Grès: Sphinx of Fashion*, Yale University Press, New Haven and London, 2008.
- [17] Blum, D. E.: *Roberto Capucci: Art into Fashion*, Ausstellungskatalog, Philadelphia Museum of Art, Yale University Press, 2011.
- [18] Quinn, B.: *Textile designers at the cutting edge*, Laurence King Publishing, London, 2009, 154-163.
- [19] Kitamura, M.: *Pleats Please by Issey Miyake*. Taschen, Tokyo, 2012.
- [20] Schmidt, P., Stattmann, N.: *Unfolded Paper in Design, Art, Architecture and Industry*, Birkhäuser, Basel, 2009
- [21] Kenneway, E.: *Origami komplett*, Augustus, Augsburg, 1991.
- [22] Barten, S.: *Starke Falten*. Ausstellungskatalog des Museums Bellerive, Verlag Museums Bellerive, Zürich, 1995.
- [23] Da Vinci, L., Leonardo, H. L.: *Das Buch von der Malerei IV Band, Nach dem Codex Vaticanus(urbinas) 1270*, Facsimile Publisher, 2015.
- [24] Deleuze, G.: *Die Falte. Leibniz und der Barock*, Suhrkamp, Frankfurt am Main, 2000, [frz. Orig.-Ausg. *Le pli. Leibniz et le baroque*, Paris, 1988].
- [25] Baal-Teshuva, J. : *Christo und Jeanne-Claude*. Taschen, Köln 2001, 82.
- [26] Wagner, M. (Hrsg.): *Die Falte. Ein Konstitutivum menschlicher Kleidung*. Hochschule für Angewandte Kunst, Wien, 1987.
- [27] Schmidt, G.: Clérambault. Psychiater und Ethnofotograf, Fotogeschichte. Beiträge zur Geschichte und Ästhetik der Fotografie 38 (1990), 48.
- [28] Deiss, A.; Galandi-Pascual, J. ; Schimpf, S.: *Einknicken oder Kante zeigen? Die Kunst der Faltung*, Ausstellungskatalog des Museums für Konkrete Kunst Ingolstadt, Kehrer, Berlin, 2015.
- [29] Pohl, H.; Brehm, G.: *Falten in Natur und Technik*, Phyletisches Museum, Jena, 2014, [http://www.phyletisches-museum.uni-jena.de/Falten\\_in\\_Natur\\_und\\_Technik.html](http://www.phyletisches-museum.uni-jena.de/Falten_in_Natur_und_Technik.html), [Aufruf: 22.08.2015].
- [30] Buri, H.; Weinand, Y.: *Origami-Faltkunst für Tragwerke*, *Detail 10* (2010), 1066–1069.
- [31] Joedicke, J. (Hrsg.): *Pier Luigi Nervi; Bauten und Projekte*, Hatje Verlag, Stuttgart 1957.

- [32] Herkrath, R.; Traut, M.: Starre Faltungen als Leichtbauprinzip im Bauwesen, *Bautechnik* 88 (2011), 2, 80–85.
- [33] Thiel-Siling, S., (Hrsg.): *Architektur! Das 20. Jahrhundert*, Prestel, New York, 1998.
- [34] Calatrava, S.: *Zur Faltbarkeit von Faltwerken*, Dissertation, ETH Zürich, Nr. 6870, 1981.
- [35] Blaser, W. (Hrsg.): *Santiago Calatrava: Ingenieur-Architektur*, 2. Aufl., Birkhäuser, Boston, 1990, 124.
- [36] Kaltenbach, F.: Vorhang aus geklebten Acrylglas - Die Vitra Produktionshalle von SANAA, *Detail* 11 (2013), 1278- 1281.
- [37] Kaltenbach, F.: Sportausbildungszentrum Mülimatt in Burgg-Windisch, *Detail* 6 (2012), 620-623.
- [38] Höfler, C.: *Form und Zeit. Computerbasiertes Entwerfen in der Architektur*; Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, 2009, 50 ff.
- [39] Stiller A. (Hrsg.): *Skizzen für die Zukunft. Werner Sobek Architektur und Konstruktion im Dialog*, Ausstellungskatalog, Müry Salzmann Verlag, 2009.
- [40] Allgaier, P.: Wohnen im Textilhaus auf der Höri, in: *„Leben & Wohnen am See: Entree*, Konstanz, 2005.
- [41] Morgan, C., L.; Sobek, W.: *Show me the future: engineering and design by Werner Sobek*, Avedition, Ludwigsburg, 2004.
- [42] Herzog, T., Krippner, R., Lang, W.: *Fassaden Atlas*, Edition Detail, Birkhäuser Berlin, 2004.
- [43] Oborn, P.: *Al Bahar Towers: The Abu Dhabi Investment Council Headquarters*, John Wiley & Sons, New York, 2013
- [44] De Bruyn, G., Mauler, H.: *Intelligente Textilien: nomadische Strategien*, Forschungsbericht, IGMA, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2002.
- [45] Loos, A.: Ornament und Verbrechen (1908) in: ders., *Trotzdem*, Prachner Wien, 1988, 79.
- [46] Nietzsche, F.: *Die Fröhliche Wissenschaft*, Vorrede Alfred Körner Verlag, Leipzig, 1923, S. 11.
- [47] De Bruyn, G. (Hrsg.): *Semperiana. Zur Aktualität Gottfried Sempers (1803-1879)*, IGMA, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003.
- [48] Caspary, U.: *Ornamente der Fassade in der Europäischen Architektur seit den 1990er Jahren*, Jovis Verlag, Berlin, 2013.

- [49] Loschek, I.: *Mode- und Kostümllexikon*. 5. Aufl., Reclam, Stuttgart, 2005, 213.
- [50] Semper, G.: *Vier Elemente der Baukunst*, Vierweg, Braunschweig, 1851.
- [51] Kähler, G. (Hrsg.): *Einfach Schwierig. Eine deutsche Architekturdebatte. Ausgewählte Beiträge von 1993-1995*, Bauwelt Fundamente 104, Vieweg, Braunschweig, 1995.
- [52] Loos, A. in: *Architektur*, 1910.
- [53] Gleiter, J. H. :*Rückkehr des Verdrängten. Zur kritischen Theorie des Ornaments in der architektonischen Moderne*, Universitätsverlag der Bauhaus-Universität, Weimer, 2002.
- [54] Loos, A.: *Hands Off! (1917)*, in *Trotzdem*, Prachner Wien, 1988, 135.
- [55] Wollheim, R.: Online unter URL: <http://www.db-bauzeitung.de/db-themen/db-archiv/die-rationalisierung-der-fantasie/> [Aufruf: 15.05.2014].
- [56] Bourdieu, P.: *Die feinen Unterschiede. Kritik der gesellschaftlichen Urteilskraft*, Suhrkamp, Frankfurt am Main 1982
- [57] Venturi, R., Brown, S., Izenour, S.: *Learning from Las Vegas: The Forgotten Symbolism of Architectural Form*, MIT University Press Group Ltd; Cambridge, Mess., 1977.
- [58] Wright, F. L.: *La Minatura*, in ders., *Schriften und Bauten*, Albert Langen, Georg Müller Verlag, München, 1963, 164.
- [59] Lausch, F.: *Falten und Zusammenfallen. Kontext und Mimesis bei Peter Eisenman*, *HRMagazin*, H. 4, 2016, 18-29.
- [60] Finster, R.; Van den Heuvel, G.: *Gottfried Wilhelm Leibniz*, Rowohlt, Reinbek, 2016.
- [61] De Bruyn, G.: *Die enzyklopädische Architektur, Die Reihe – Architektur Denken 2*, Transcript, Bielefeld, 2008, 20-22, 122ff.
- [62] Lynn, G. (Hrsg.): *Folding in Architecture, Architectural Design*, Bd. 63, London, 1993.
- [63] Eisenman P., Judy, G. (Hrsg.): *Unfolding Events. Frankfurt Rebstockpark and the Possibility of ! New Urbanism, Unfolding Frankfurt*, Berlin 1991, 9–17.
- [64] Rajchman, J.: *Eisenman Architects. Unfolding Frankfurt*. Ernst & Sohn, Berlin, 1991.
- [65] Martin, S.: *Der große Wurf. Faltungen in der Gegenwartkunst*, Ausstellungskatalog, Kunstmuseum Krefeld, Modo, Freiburg, 2008.

- [66] Frampton, K.; *Grundlagen der Architektur; Studien zur Kultur des Tektonischen, Oktagon*, München-Stuttgart, 1993.
- [67] Pell, B.: *The Articulate Surface: Ornament and Technology in Contemporary Architecture*, Birkhäuser, Basel, 2010.
- [68] Bloomer, K. A.: „Critical Distinction between Decoration and Ornament“, in: Abruzzo, E., Salomon, J., D. (Hrsg.), *Decoration*, 306090 Books, New York, 2006, 49.
- [69] Sullivan, L.: „Ornament in Architecture (1892)“, Twombly, R., (Hrsg.), *The Public Papers*, University of Chicago Press, Chicago, 1988, 81-82.
- [70] Lynn, G.: „The Structure of Ornament“, Interview in: Leach, N., Turnbull, D., Williams, C. (Hrsg.), *Digital Tectonics*, John Wiley & Sons, Chichester, 2004, 63 - 65.
- [71] Herzog, J. zitiert nach Kipnis, J. „A Conversation with Jacques Herzog (H&deM)“, in: *El Croquis*, Nr. 84, 1997, 18.
- [72] Zaero-Polo, A.: „Die Al-Chemical Brothers“, in: Ursprung, P. (Hrsg.), *Herzog und de Meuron: Naturgeschichte*, Canadian Center for Architecture, Lars Müller, Montreal, 2002/2005, 183-187.
- [73] Hild, A. zitiert nach Stuhlmacher, M., „Vanity and Self-Will: The Complex, Contradictory Work of Hild und K“, in: *Ornament, OASE*, Nr. 65, 2004, 32.
- [74] Simmel, G.: *Philosophie der Mode*, Shurkamp, Frankfurt a.M., 1995, 9-37.
- [75] Loos, A., Opel, A., (Hrsg.): *Adolf Loos Gesammelte Schriften*, Braumüller Verlag, 2010.
- [76] Mies van der Rohe, L.: zit. nach: Carter, P.: *Mies van der Rohe at Work*, Praeger Publishers, New York, 1974, S. 61.
- [77] Blaser, W: *Mies van der Rohe – less is more*, Waser Verlag, Zürich, 1986, 63-77.
- [78] Harather, K.: *Haus-Kleider. Zum Phänomenen der Bekleidung in der Architektur*, Böhlau Verlag, Wien, 1995, 103.
- [79] Ginsburger, R.: Bemerkungen eines Architekten über Mode, *Die Form*, H.16, 1930, S. 425.
- [80] Schlicksupp, H.: *Produktinnovation. Wege zu innovativen Produkten und Dienstleistungen*, Vogel, Würzburg, 1988, 25 ff.
- [81] Trautz, M.; Ayoubi, M.: Das Prinzip des Faltens in Architektur und Ingenieurbau, *Bautechnik* 88 (2011), 2, 76-79.

- [82] Künstler, A., Trautz, M.: Wandelbare Faltungen aus biegesteifen Faltenelementen, *Bautechnik* 88 (2011), 2, 86-93.
- [83] Barej, M., et al.: Systematisierung gefalteter und faltbarer Strukturen in technischen Anwendungen, *Konstruktion* (2013), 1-2, 69-74.
- [84] Herkrath, R.; Trautz, M.: Starre Faltungen als Leichtbauprinzip im Bauwesen, *Bautechnik* 88 (2011), 2, 80-85.
- [85] Jackson, P.: *Complete Pleats: Pleating Techniques for Fashion, Architecture and Design*, Laurence King Publishing, London, 2015.
- [86] Jackson, P.: *Folding Techniques for Designers: From Sheet to Form*, Haupt, Wien, 2011.
- [87] Buri, H.: Origami: Faltstrukturen aus Holzwerkstoffen, *Holzforschung Schweiz*, 2006, 2, 8-12.
- [88] Buri, H.; Weinand, Y.: Origami-Faltkunst für Tragwerke, *Detail* 10 (2010), 1066-1069.
- [89] Strwart, I.: Origami tessellation, *Scientific American* (1999), 280, 100-10.
- [90] Zeier, F.: *Papier, Versuche zwischen Geometrie und Spiel*, Haupt, Bern, 1993.
- [91] Schröder, S. (Hrsg.): *Crumpling: Papierkunstwerk von Vincent Floderer*, Ausstellungskatalog, Origami Galerie Freising, Viereck, Freising, 2008.
- [92] Hansen, E. : *Strain facies*, Springer, Berlin, 1971.
- [93] Eisbacher, G.: *Einführung in die Tektonik*, 2.. Aufl., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1996.
- [94] Burg, J-P.: Einführung in die Strukturgeologie. Vorlesungsskriptum zum Grundkurs Strukturgeologie; GI, ETH Zürich, 2001.
- [95] Singer R.: *Stoff Manipulationen*, Stiebner, München, 2014.
- [96] Hennig, D., Koll, U.: *Gewebetechnik*, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1978.
- [97] Batrla, T.: Dekorationsstoff Origami, <http://red-dot.de/pd/online-exhibition/work/?code=2013-11-3227>, [Aufruf: 12.09.2014].
- [98] Kienbaum, M.: *Bindungstechnik der Gewebe*, Bd.3, Schiele & Schön, Berlin, 1996.
- [99] Cherif, Ch. (Hrsg.): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken, Verfahren, Materialien, Eigenschaften*, Springer, Heidelberg, 2011.

- [100] Seidel, M.: *Textile Hüllen – Bauen mit biegeweichen Tragelementen*, Ernst & Sohn, Berlin, 2008.
- [101] Knippers, J., et. al.: *Atlas Kunststoffe und Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion*. 1. Aufl., Edition Detail, München, Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2010.
- [102] Moritz, K.: *Membranwerkstoffe im Hochbau – Gewebe und Folien*, in: *Transluzente Materialien*, Edition Detail, Institut für Internationale Architektur- Dokumentation, München, 2003.
- [103] Pudenz, J.: *Membranmaterialien*, in: *Bauen mit Membranen – der Innovative Werkstoff in der Architektur*, Prestel, München, 2004.
- [104] Sobek, W., Speth, M.: *Textile Werkstoffe*, *Bauingenieur* 70, (1995), 243-250
- [105] Hofer, A.: *Stoffe 1: Textilrohstoffe-Garne-Effekte*, 4. Aufl., Schriftenreihe der Textil-Wirtschaft, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, 1987.
- [106] Orpana, M.; Houtman, R.: *Materials for Membrane Structures*, Beitrag zum Workshop Textile Roofs, Berlin, 2000.
- [107] Falkai, B. von (Hrsg.): *Synthesefaser: Grundlagen, Technologie, Verarbeitung und Anwendung*, Verlag Chemie, Basel, 1981.
- [108] Hofer, A.: *Stoffe 2: Bindung-Gewebemusterung-Veredlung*, 4. Aufl., Schriftenreihe der Textil-Wirtschaft, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, 1987.
- [109] Mitterer, Ch., Kaufmann, A.: *Membrane im Bau-bauphysikalische Optimierung und neue Einsatzbereiche*, Forschungsbericht, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2007.
- [110] Verseidag Industrietextilien GmbH: Produktinformationen über beschichtete Gewebe, Krefeld, 1993.
- [111] Koch, K-M. (Hrsg.): *Bauen mit Membranen – Der innovative Werkstoff in der Architektur*, Prestel, München, 2004.
- [112] W. L. Gore & Associates GmbH: Produktinformationen zu Tenara-Membranen, Putzbrunn, 1993.
- [113] Krüger, S.: *Textile Architecture - Textile Architektur*, Jovis, Berlin, 2009.
- [114] Fasold, W.; Veres, E.: *Schallschutz + Raumakustik in der Praxis*. 2. Aufl., Verlag für Bauwesen, Berlin, 2003.
- [115] DIN 4109. Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise. DIN Taschenbuch 35: Schallschutz, Beuth, Berlin, 1997.

- [116] Willems, W.; Schild, K.; Stricker, D.: *Schallschutz - Bauakustik*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012.
- [117] Mehra, S.-R.: *Berechnung der Luftschalldämmung von einschaligen Trennbauteilen endlicher Abmessung*, Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.
- [118] Blum R., Wagner, R.: *Anforderungsprofil zur Lärmdämmung im Membranbau*, 1. Umwelt-Kolloquium Denkendorf, Innovative textile Werkstoffe für den Umweltschutz, Denkendorf, 2005.
- [119] Mehra, S. R.; et al.: *Akustisches Verhalten von Hüllenkonstruktionen aus Folien und Membranen – AHAFUM*, Abschlussbericht zum DFG-Projekt, Universität Stuttgart, 2004.
- [120] Mösler, M.: *Technische Akustik*, 9. Aufl., Springer, Berlin, 2012.
- [121] Holst, S.: Suvarnabhumi international Airport Bangkok- Innovative Klimakonzepte, *Detail*, 7/8 (2006), 820.
- [122] Ackermann, L.: *Simulation der Schalltransmission durch Wände*, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2001.
- [123] Mommertz, E.: *Akustik und Schallschutz*, Edition Detail, München, 2008.
- [124] Tennhardt, H. P.: Akustische Dimensionierung von Faltungsstrukturen mit dreieckförmiger Schnittführung. *Bauforschung – Baupraxis*, 229 (1988), 18-26.
- [125] Möser, M.: *Messtechnik der Akustik*, Springer, Berlin, 2007.
- [126] DIN EN ISO 717-1. Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen. Teil 1: Luftschalldämmung. DIN Taschenbuch 35: Schallschutz, Beuth, Berlin, 1997.
- [127] Kurtze, G.: Light-weight walls with high transmission loss. *Acustica*, 9 (1959), 441-445.
- [128] Hashimoto, N. und Katsura, M.: Sound insulation of a rectangular thin membrane with additional weights. *Applied Acoustics*, 33, (1991), 1, 21-43.
- [129] Gengnagel, C.: *Mobile Membrankonstruktionen*, Dissertation, Technische Universität München, 2005.
- [130] Mehra, S. R.: Aufblasbarer Schallschutz mit Bauteilen aus Folien und Membranen. *Bautechnik*, 79 (2002), 1, 794-797.
- [131] Leistner, P.; Drotleff, H.: *Membrane im Bau – bauphysikalische Optimierung und neue Einsatzbereiche*, IBP-Forschungsbericht Teilbereich 3 und 4, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2005.

- [132] Schmid, F. et al.: *Adaptive Raumakustik und akustische Konditionierung im Bauwesen (ARAKO). Adaption der akustisch wirksamen Parameter von Textil- und Membransystemen zur Verbesserung bauakustischer Maßnahmen sowie zur Steigerung und Anpassung der Raumakustik und Raumklangqualität*, Forschungsbericht, Forschungsinitiative Zukunft Bau 2948, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2015.
- [133] DIN EN ISO 10140 – Teil 2: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand: Messung der Luftschalldämmung, 2010.
- [134] Studie Bundesministerium: *Technikbewertung von Aerogelen*, Studie im Auftrag von Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien, 1994.
- [135] Leistner, P.; et al.: *Akustik von Membrankissen*, 2. Fachsymposium zum konstruktiven Membranbau WISA, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2009.
- [136] DIN 5031 Teil 7: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche, (IR, VIS und UV), 1984.
- [137] Witting; W.: *Licht. Sehen. Gestalten: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen für Architekten und Lichtdesigner*, Birkhäuser, Basel, 2014
- [138] Boltzmann, L: Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie, in: *Annalen der Physik und Chemie*. Bd.22, 1884, S. 291–294.
- [139] Schmid, F., et al.: *Recherchebericht zum Forschungsbericht: Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen, Beispiele zur konstruktiven Ausführung mehrlagiger Membranbauwerke*, Universität Stuttgart, 2011.
- [140] Göppert, K.; Linden, S.: Erneuerung der abgehängten Decke in der Olympiaschwimmhalle in München, *Detail*, 5, (2008), 508ff.
- [141] Cremers, J.; Lausch, F.: Transluzente Hochleistungsämmung aus Slika Aerogelen für Membranen, *Detail*, 5 (2008), 524ff.
- [142] Studie Bundesministerium: *Technikbewertung von Aerogelen*, Studie im Auftrag von Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien, 1994.
- [143] Kipp und Zonen, Bedienungseinleitung Version 0306-D, Pyranometer Typ: CM11, Hersteller Kipp und Zonen, Niederlande, 2012.
- [144] Otto, F.: *Das hängende Dach*, Bauwelt, Berlin, 1954.
- [145] Sobek, W.. *Entwerfen im Leichtbau*; in: Themenheft Forschung Leichtbau, Nr. 3, Universität Stuttgart, 2007, 70-82.
- [146] Bögle, A.: Textile Architektur, in: *Kunst und Kirche*, 73, 2010, 42-44.

- [147] Sobek, W.: Zum Entwerfen im Leichtbau, *Bauingenieur* 70, 1995, 323-329.
- [148] Blaser W.: *Mies van der Rohe - less is more*, Wasser Verlag Zürich, 1986.
- [149] Davies, M.; Rogers, R.: "A Wall for All Seasons", *Riba Journal* 88, 1981, 2, 55-57.
- [150] De Bruyn, G: *Überdruss und Überfluss. Architektonische Umwertungen*, in: K 1 Transfer, Katalog zur Ausstellung der Stuttgarter Architekturfakultät im DAM, München, 2005.
- [151] Yordanova, M.; Endres, E.: Fassaden als passive Botschaften im städtebaulichen Kontext, *Innovative Fassadentechnik* 2, Ernst & Sohn Spezial, 2014, 16-18.
- [152] Lederer, A.: Fassaden als Meinungsäußerung, *Detail* 6, (2016), 478-481.
- [153] Schittich, C. (Hrsg.): *Gebäudehüllen*, 2 erw. Aufl., Birkhäuser, Edition Detail, Basel, 2006.
- [154] Ohlhauser, G.: Die Emanzipation der Oberfläche vom Material; *Das internationale Jahrbuch der Oberfläche* 2013, Surface, 2013.
- [155] Gleiniger, A.; Vrachliotis, G.: *Muster: Ornament, Struktur und Verhalten (Kontext Architektur)*, Birkhäuser, Basel, 2009.
- [156] Klein, S.: *Form und Farbe, Designbascis* 2, [http://www.gestaltung.hs-mannheim.de/designwiki/files/8500/form\\_und\\_farbe.pdf](http://www.gestaltung.hs-mannheim.de/designwiki/files/8500/form_und_farbe.pdf) [Aufruf: 13.02.2016]
- [157] Schlegel, M: Farbe-Produkt, Oberfläche, Wirkung, *Detail* 6, (2006), 658 – 664.
- [158] Heilmann, H.: Proportion und Funktion: Die Funktion der Fassade im städtebaulichen Kontext, *DBZ* 4 (2007), S. 77-79.
- [159] Harry, P (Hrsg.): *Lexikon der Optik*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2003.
- [160] Rock, I.: *Wahrnehmung. Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1985.
- [161] Sczepek, J.: *Visuelle Wahrnehmung: Eine Einführung in die Konzepte Bildentstehung, Helligkeit und Farbe, Raamtiefe, Größe, Kontrast und Schärfe*, Books on Deman, Norderstedt, 2011.
- [162] Müller, W.; Schumann, H.: *Visualisierung: Grundlagen und Allgemeine Methoden*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2000.