

Diploma Thesis

## **New facade materials and their applications**

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

## **Neue Fassadenmaterialien und deren Anwendungen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Želimir Vuković, BSc**

Matr.Nr.: 01428678

unter der Anleitung von

**Univ. Prof. Agathe Robisson PhD**

**Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl Deix**

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie  
Forschungsbereich Baustofflehre und Werkstofftechnologie  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/207-01, A-1040 Wien

Wien, im Mai 2021

---

# Kurzfassung

Die modernen Architekturbauten von Coop Himmelblau, Frank O. Gehry, Zaha Hadid und vielen anderen wären ohne neue Fassaden- und Dachmaterialien sowie deren Tragsystemen nicht möglich. Diese Diplomarbeit befasst sich mit diesen Materialien, ihren Befestigungen und innovativen Tragsystemen. Im ersten Teil werden neben herkömmlichen Werkstoffen, auch die in jüngerer Zeit entwickelten und verbesserten Materialien und deren Eigenschaften und Einsatz dargestellt. Das Spektrum möglicher Werkstoffe reicht von HPL (High Pressure Laminate) - und faserverstärkten Harzkompositplatten, über Tafeln aus Faserzement oder Steinwolle, Keramik und Feinsteinzeug, bis hin zu Metallen wie Kupfer, Titanzink, Aluminium-Verbundplatten, Aluminiumtafeln, Ziegel und fassadentauglichen Gewebe. Daneben wird untersucht, welche Befestigungsart für ausgewählte Systeme am besten geeignet ist.

Anschließend werden innovative Fassadensysteme dargestellt und deren Einsatz in der Fassade untersucht. Der Einsatz von Trägerplattensystemen für individuelle Applikationen mit Glas, Naturwerkstein, Putz oder Keramik ist auch möglich. Je nach Material sind vielfältige Formen, Formate und Farben von Platten, Tafeln oder Kassetten verfügbar. Besonders interessant sind die Fassaden aus Gitter oder Geweben, Membran- und Ganzglasfassaden -und -dächer. Deren Einsatz erfordert viel Erfahrung und eine sorgfältige Planung. Insbesondere soll auf das Verformungsverhalten der Tragkonstruktion in Abhängigkeit von ausgewählten Elementen für die Bekleidung eingegangen werden.

In dieser Arbeit soll auch auf die Vorgehensweise bei der Planung eingegangen werden. D.h. für verschiedene Fassaden- bzw. Dachmaterialien sollen - entsprechend den Anforderungen - die wichtigsten Punkte bei der Planung dargestellt werden.

# Abstract

The modern architectural buildings of Coop Himmelblau, Frank O. Gehry, Zaha Hadid and many others would not be possible without new facade and roof materials and their support systems. This thesis deals with these materials, their fastenings and innovative support systems. In the first part, in addition to conventional materials, recently developed and improved materials and their properties and applications are presented. The spectrum of possible materials ranges from HPL (High Pressure Laminate) and fiber-reinforced resin composite panels, to panels made of fiber cement or rock wool, ceramics and fine stoneware, to metals such as copper, titanium zinc, aluminum composite panels, aluminum panels, bricks and fabrics suitable for facades. Alongside this, the most suitable fastening method for selected systems is examined.

Innovative facade systems are then presented and their use in the facade is examined. The use of support panel systems for individual applications with glass, natural stone, plaster or ceramics is also possible. Depending on the materials, a wide variety of shapes, formats and colors of panels, boards or cassettes are available. Particularly interesting are the facades made of mesh or fabric, membrane and all-glass facades - and roofs. Their use requires a lot of experience and careful planning. In particular, the deformation behavior of the supporting structure as a function of selected elements for the cladding will be discussed.

In this thesis, the planning procedure should also be discussed. This means that the most important points should be presented during planning for various facade and roof materials - depending on the requirements.

# Danksagung

Ich freue mich meine akademische Laufbahn mit dieser Diplomarbeit zu beenden. Sie ist das Finale einer spannenden Phase meines wissenschaftlichen Lebens.

Für die Betreuung bei der Erstellung dieser Diplomarbeit möchte ich mich an Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl Deix bedanken, der als betreuende Person mich kontinuierlich unterstützt hat. Darüber hinaus danke ich den allen Mitarbeitern des Institutes für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie (Forschungsbereich Baustofflehre und Werkstofftechnologie) für ein harmonisches und produktives Arbeitsklima.

Ferner möchte ich meinen Studienkollegen für ihre hilfreiche Unterstützung während meines ganzen Studiums danksagen.

Auch meinem Chef, Herrn Heinz Niedermüller, bin ich für seine Geduld sowie Flexibilität zu großem Dank verpflichtet.

Jedoch bin ich meiner Familie den größten Dank schuldig, die mein Studium unterstützt, mir vollkommen vertraut und mich immer zur Weiterbildung angeregt hat.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>6</b>
1.1	Motivation.....	6
1.2	Zielsetzung.....	8
<b>2</b>	<b>Fassadenmaterialien .....</b>	<b>9</b>
2.1	Beton.....	9
2.2	Glasfaserbeton .....	19
2.3	Faserzement.....	24
2.4	Acrylstein - Corian®.....	27
2.5	Keramik.....	32
2.6	Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) .....	35
2.7	High Pressure Laminates (HPL) .....	39
2.8	Wood Polymer Composites (WPC).....	41
2.9	Metall .....	44
2.10	Holz.....	47
2.11	Glas .....	50
2.12	Das Fassadenmaterial „Made of Air“ (MOA).....	55
<b>3</b>	<b>Komplexe Fassadensysteme .....</b>	<b>56</b>
3.1	Membransysteme – Textilfassaden.....	56
3.2	Ganzglasfassaden.....	61
<b>4</b>	<b>Fassadenplanung.....</b>	<b>63</b>
4.1	Parametrische Planung .....	63
4.2	Computergestütztes Design von kaltgebogenen Glasfassaden.....	66
<b>5</b>	<b>Swatch Hauptquartier.....</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>78</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Dass Fassaden immer komplexer werden, zeigen zahlreiche moderne Bauten mit anspruchsvollen Geometrien. Um diese architektonisch vielfältigen Formen verwirklichen zu können, muss man Fassadenmaterialien immer weiterentwickeln und nach innovativen Techniken und Konstruktionsprinzipien anstreben. Daher ist es interessant, Neuigkeiten aus diesem Bereich zu zeigen, was heute existiert und wohin die Zukunft geht.

Wenn die Gebäude keine Regelmäßigkeit, Reihung oder Symmetrie besitzen, spricht man von dekonstruktivistische Architektur. So wurden weltweit zahlreiche beeindruckende, dekonstruktivistische Gebäude bereits realisiert, die gebaute Welt radikal verändert haben. Diese besondere Bauweise erfordert auch besondere Materialien, die die Realisierung von komplexen und parametrischen Fassadenformen ermöglichen. Daher sind innovative Werkstoffe, die folgt zusammengestellt sind, unabdingbar.

- Beton ist ein Trendwerkstoff, der in Form dünnwandigen Sichtbetonfassaden mit Gewichtsreduktion an die Fassade gebracht wird. Mit Beton kann eine monolithische Bauweise erzielt werden, was dieses Material unter Architekten sehr beliebig macht. Mit der Zugabe verschiedener Zusatzstoffe, können dem Beton besondere Eigenschaften gegeben werden. Besondere Betone werden wegen ihren speziellen Eigenschaften häufig verwendet (siehe *Heydar Aliyev Center* von Zaha Hadid).
- Glasfaserbeton (GFB) ist ein mit Glasfasern verstärkter Beton. Aus diesem Werkstoff entstehen Fassadenpaneele, die robuste Eigenschaften aufweisen.
- Faserzement ist ein beständiger Verbundwerkstoff aus Zement und zugfesten Fasern. Die Fasern übernehmen eine ähnliche Funktion wie der Stahl im Stahlbeton. Aus diesem Werkstoff werden hochverdichtete Faserzementplatten hergestellt.
- Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK), ist ein Faser-Kunststoff-Verbund aus Kunststoff (Matrix) und Glasfasern. Aus diesem Werkstoff werden zahlreiche Fassadenplatten produziert, die meist für vorgehängte, hinterlüftete Fassaden zum Einsatz kommen.
- Mineralwerkstoffe wie Acrylsteine kommen wegen ihrer Formbarkeit ebenfalls häufig zum Einsatz (siehe *Leonardo Glass Cube* in Bad Driburg).
- Mit verschiedenen Metalllegierungen sind komplexe Fassaden realisierbar. Solche Fassaden sind vor allem durch ihre Widerstandsfähigkeit und Schutzschicht sehr langlebig. Einen großen Einsatz findet Metall bei Verbundwerkstoffen (Composites). Mit innovativen Entwicklungen im Bereich der Metallfassaden, sind ebenfalls freie Gebäudeformen realisierbar (siehe *Guggenheim Museum* von Frank O. Gehry).

- Holz gilt als ein natürliches, ökologisches und klimaschonendes Material. Die Fassaden aus diesem Werkstoff sind vielseitig und dauerhaft. Durch entsprechende Wahl der Holzarten, Art der Montage und Oberflächenbehandlungen, lassen sich individuelle Fassaden gestalten.
- Glas ist wahrscheinlich der beliebteste Werkstoff in der modernen Architektur, wenn es um komplexe, freigeformte Fassaden geht. In Kombination mit der passenden Stahlunterkonstruktion sind außergewöhnliche Ideen in moderner Architektur realisierbar. Dieser Werkstoff kann auf verschiedenen Arten und Weisen eingesetzt werden, womit die Realisierungen von unterschiedlichen Ideen ermöglicht werden (siehe *Chadston Shopping Centre* in Melbourne).
- „Made of Air“ (MOA) ist ein neues und innovatives Material, das auf Biokohle basiert und zu 90 Prozent aus Kohlenstoff besteht, der aus der Luft zurückgewonnen wird.

Mit Membransystemen werden dünnwandige, gespannte Fassadenkonstruktionen realisierbar. Es handelt sich um einlagige Flächentragwerke, die multifunktionalen Eigenschaften aufweisen, wie Lastabtrag, Belichtung, Ästhetik, Bauphysik oder sogar die Steuerung des Raumklimas und des Lichtes. Am häufigsten kommen textile Fassaden zum Einsatz, aber es gibt auch Varianten mit Kunststoff-Folien wie ETFE-Folien als gespannte Membrankonstruktionen.

Mit Ganzglasfassaden wird eine maximal erreichbare Transparenz erreicht, sowie komplett rahmenlose und nahezu unsichtbare Fassade geschaffen. Es handelt sich um sehr komplexe Glaskonstruktionen, die aus gebogenen oder planen Scheiben ausgeführt werden. Interessant dabei sind speziell die Verbindungselemente, die kaum zu sehen sind.

Freigeformte Fassaden bestehen meistens aus hunderten Elementen, die EDV-mäßig erfasst werden müssen. Unumgänglich ist es, Fassadenteile zu standardisieren, um ihre Herstellung zu automatisieren. Dies ist mit Hilfe der Parametrischen Planung machbar. Die bekanntesten Programme dafür sind „Rhino Grasshopper“, „Revit“, „3ds Max“ sowie „Blender“ etc. Mit diesen Werkzeugen stehen den Architekten die nötigen Möglichkeiten zum Entwurf und Realisierung freigeformter Oberflächen zur Verfügung.

Die Realisierung von gebogenen Glasfassaden ist typischerweise ein aufwändiger und teurer Prozess, bei dem Glasscheiben erhitzt und in Form gebracht werden müssen. Eine kostengünstige Alternative sind kalt gebogene Glasscheiben. Dabei ist es sehr schwierig eine herstellbare und dennoch ästhetisch ansprechende Form zu finden. Auf dieses Thema wird ebenfalls eingegangen.

## 1.2 Zielsetzung

Aufgrund der raschen Entwicklung in den letzten Jahren sowohl der Materialien selbst als auch der „parametrischen“ Planungssoftware wird in dieser Arbeit eine systematische Zusammenstellung von Fassadenmaterialien erstellt. Neben den herkömmlichen Werkstoffen werden neue Produkte und innovative Entwicklungen aufgezeigt. Insbesondere wird auf deren Einsatzmöglichkeiten im Fassadenbereich sowie auf die Befestigungsmöglichkeiten eingegangen. Weiteres werden einige komplexe Fassadensysteme beschrieben und dabei deren gestalterische, bauphysikalische und mechanische Anforderungen und Funktionen untersucht.

Ziel ist es, den aktuellen Stand der Technik bezüglich der Materialien und der Planungsmöglichkeiten für Fassaden darzustellen.

Gliederung der Arbeit:

- Im Kapitel 2 werden die unterschiedlichen Fassadenmaterialien erfasst.
- Im Kapitel 3 wird das Augenmerk auf die komplexen Fassadensysteme gerichtet.
- Das Kapitel 4 widmet sich den modernen Planungsmethoden der Fassaden.
- Das Kapitel 5 behandelt ein bestehendes Gebäude, wobei besonders auf die Fassadenplanung eingegangen wird.
- Die Zusammenfassung erfolgt im Kapitel 6.

# 2 Fassadenmaterialien

## 2.1 Beton

### Eigenschaften

Beton ist eine Mischung aus Bindemittel, Gesteinskörnung, Wasser sowie Zusatzmittel oder Zusatzstoffe. Beton besitzt eine sehr hohe Druckfestigkeit. Seine geringe Biegezugfestigkeit nach dem Erhärten kann durch eine Stahlbewehrung wesentlich erhöht werden.

Je nach Trockenrohichte wird Beton wie folgt klassifiziert:

- Schwerbeton ( $>2600 \text{ kg/m}^3$ )
- Normalbeton ( $2000\text{-}2600 \text{ kg/m}^3$ )
- Leichtbeton ( $800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ )

und in folgenden Druckfestigkeitsklassen eingeteilt:

- Normalfeste Betone (C8/10 bis C50/60)
- Hochfeste Betone (C55/67 bis C100/115)
- Leichtbetone (LC8/9 bis LC50/55)

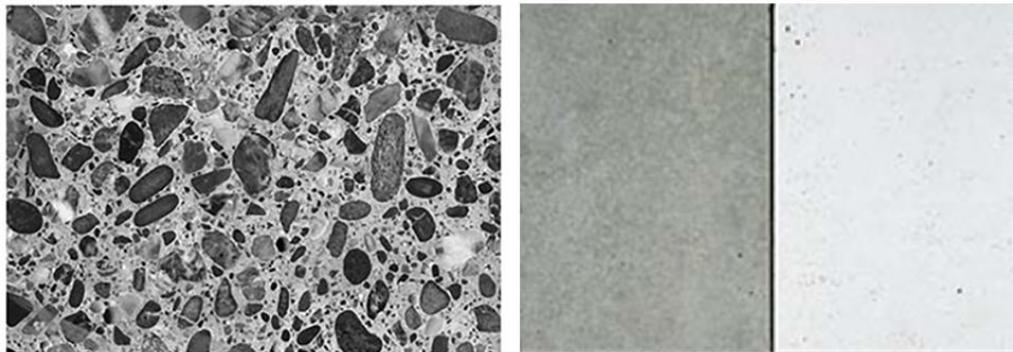


Abbildung 2.1 Beton-Mikrostruktur (links) und Sichtbeton mit grauem bzw. weißem Portlandzement bei gleichen Gesteinskörnungen (rechts) [1]

Auf Normalbeton wird – da er ohnehin Stand der Technik ist – hier nicht weiter eingegangen, sondern nur auf UHPC. Zu erwähnen ist auch selbst verdichtender Beton (SVB), der aufgrund seiner flüssigen Konsistenz kein Verdichten erfordert. Damit können besonders geformte und dichte Oberflächen hergestellt werden.

### Ultrahochleistungsbeton (UHPC)

Ultrahochleistungsbeton (UHPC - Engl.: Ultra High Performance Concrete) ist eine Betonsorte, die sich durch ein sehr dichten Mikrogefüge auszeichnet. Daraus resultieren die den UHPC prägenden Eigenschaften, wobei unter anderem die hohe Festigkeit ( $>150 \text{ MPa}$ ) [39]. UHPC wird für Bauwerke oder Bauteile verwendet, die neben einer hohen Tragfähigkeit einen großen Widerstand gegen physikalische oder chemische Einwirkungen aufweisen müssen [12]. Mit Hochleistungsbeton können Bauteile bei gleicher Tragfähigkeit deutlich filigraner gestaltet werden, sodass sich Material und damit auch Energie einsparen lassen.

Ultrahochleistungsbetone weisen folgende Eigenschaften auf:

- Sehr hohe Druckfestigkeit von über  $150 \text{ N/mm}^2$
- Stark erhöhte Dauerhaftigkeit
- Erhöhte Beständigkeit gegenüber chemischen sowie auch mechanischen Angriffen

Ein Nachteil des UHPC ist seine hohe Sprödigkeit. Deshalb wird UHPC in der Regel Fasern beigemischt, um die Duktilität zu erhöhen. Je nach Fasergehalt können die Fasern auch rissüberbrückend wirken, wodurch die Nachrisszugfestigkeit die Matrixzugfestigkeit übersteigt (strain hardening) [39].

UHPC setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen zusammen [40]:

- **Zement:**  
Bindemittel, CEM I, CA<sub>3</sub> frei, ca.  $600\text{-}700 \text{ kg/m}^3$ , (30-80  $\mu\text{m}$ )
- **Mikrosilika:**  
reines SiO<sub>2</sub>, Durchmesser 0,5-1  $\mu\text{m}$ , für hohe Packungsdichte, weiters hydraulische Reaktion mit Calciumhydroxid zu Calciumsilikathydrat, insbesondere die Verbindung Gesteinskorn zu Zementstein wird verbessert
- **Quarzsand:**  
feine Gesteinskörnung (100-2000  $\mu\text{m}$ )
- **Quarz- oder Kalkmehl:**  
sehr feine Bestandteile für optimale Packungsdichte (60-125  $\mu\text{m}$ )
- **Wasser:**  
w/z-Wert 0,24-0,28; kein physikalisch geb. Wasser in Kapillarporen
- **Fließmittel:**  
Polycarboxylether PCE: Hochleistungsfließmittel
- **Fasern:**  
zur Erhöhung der Duktilität nach Bruch



Abbildung 2.2 Bestandteile des UHPC [40]

## Einsatz in Fassaden

Beton ist ein künstlicher Stein und gilt als moderner Baustoff, der sich um 1900 vor allem im Bereich der Industrie- und Wirtschaftsbauten wie Großmarkt- und Fabrikationshallen durchsetzt hat. Der erste Einsatz des Betons in der Fassade eines Wohnhausbaus war am Stadthaus vom Auguste Perret in der Rue Franklin (1903) [2].

Dank seiner Funktionalität und Formbarkeit wird der Werkstoff Beton mit unbegrenzten Möglichkeiten für die in der Gestaltung der Fassade sehr gerne eingesetzt.

Im Fassadenbereich wird Beton in den folgenden Arten verwendet:

- **Ortbeton - Sichtbeton**  
Es werden besondere Anforderungen an das Aussehen der Betonoberfläche gestellt. Bei der Fassadengestaltung sind die Fugenanordnungen, Schalungsstöße und Ankerstellen zu berücksichtigen.
- **Sandwichtafeln**  
Bei den Sandwichtafeln handelt es sich in der Regel um drei- bis vierschichtige vorgefertigte Fassadentafeln. Die Sandwichplatten werden im Bauwerk hergestellt und auf der Baustelle montiert.
- **Betonwerksteine**  
Es werden kleine Formate bis zu einer Größe von etwa einem Quadratmeter meist unbewehrt eingesetzt. Bei der Gestaltung sind durch die entsprechend geformten Schalungen auch dreidimensional geformte Elemente möglich.

Im folgenden Baumdiagramm wird die typologische Zuordnung des Betons in der Fassade dargestellt.

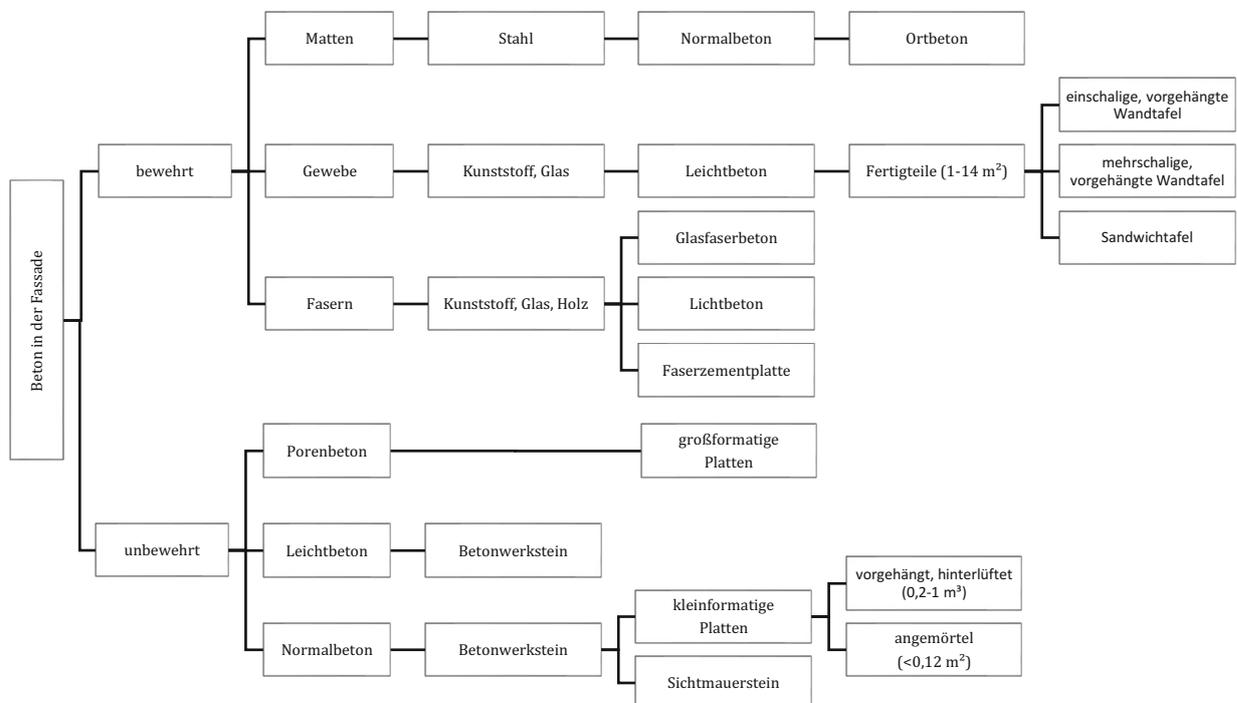


Abbildung 2.3 Typologische Zuordnung „Beton in der Fassade“ [2]

Da der Beton viele verschiedene Einsatzmöglichkeiten in der Fassade aufweist, muss er sehr unterschiedlichen produktions- und herstellungstechnischen sowie normativen Anforderungen entsprechen. Es gibt auch viele farbige und strukturelle Gestaltungsmöglichkeiten der Oberfläche wie z.B. schwer-leicht, dämmend-speichernd, gefügedicht-offenporig. Die monolithische Bauweise wird heutzutage von Architekten oft verwendet, was die Vermeidung jeglicher Arbeitsfugen, das Abzeichnen der Schalungsanker bedingt. All dies führt bei diesem leistungsfähigen Material zu enormen bautechnischen Herausforderungen.

Weiters werden die o.a. Einsatzmöglichkeiten des Betons in der Fassade ausführlicher beschrieben.

## Sichtbeton - Ortbetonfassade

### Eigenschaften

Unter Fassaden aus Beton versteht man meistens eine Ortbetonherstellung, wobei in diesem Zusammenhang die Sichtbetonfassaden gemeint sind. Sichtbetonfassaden sind nicht verputzte und unverblendete Fassaden. Architekten verwenden derartige Fassaden gerne zur Erzielung eines minimalistischen Stils.

Es werden hierbei verschiedene Methoden zur Gestaltung der Betonfläche verwendet, um die gewünschte Aussicht der Fassade zu erzielen. Dazu zählen:

- Besonderer Einsatz der Schalung:
  - Raue Bretter
  - Glatte Kunststoffschalung
  - Gespundete Bretter
  - Strukturschalung
  - Gehobelte oder geflammte Bretter
  - Textile Schalungsbahnen
- Gezielte Betonzusammensetzung:
  - Unterschiedliche Zementsorten
  - Farbige Zuschläge
  - Zusätze

### *Einsatz von Brettschalungen*

Es werden in der Regel natürliche Holzoberflächen, wie unbehandelte Nadelholzbretter eingesetzt. Mit dem Einsatz solcher stark saugender Schalhäute aus rohem Holz wird an der Betonoberfläche eine raue Oberflächentextur erzeugt. Dabei werden Ausblutungen und die Bildung von sichtbaren Poren an der Betonoberfläche verhindert, da oberflächen-nahe Luft- und Wasserblasen in das Holz einziehen. Um die gewünschte Fassadenoberfläche zu erzielen, ist viel Erfahrung im Umgang mit den Schalmaterialien und deren Wechselwirkung mit frischem Beton erforderlich. Es handelt sich also um eine Bauaufgabe mit besonderer Schwierigkeit [3].

### *Einsatz von glatter Schalung*

Das Ziel ist es eine möglichst einheitliche, glatte Betonoberfläche zu gestalten. An derartigen Fassaden sind jedoch Schalhautfugen und Löcher der Schalungsanker bemerkbar [3].

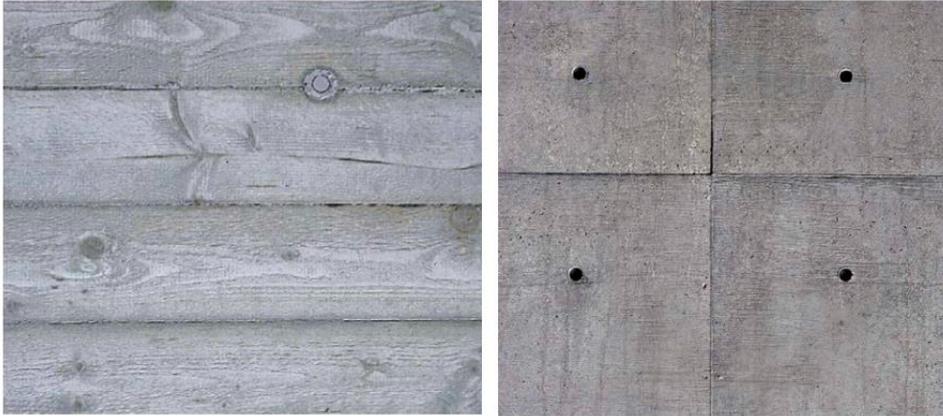


Abbildung 2.4 Brettstruktur sägerau, ungehobelte Bretter (links) und schalungsglatte Oberfläche mit Elementstößen (rechts) [3]

### *Einsatz von Matrizenschalungen*

Unter Schalungsmatrizen versteht man elastische Kunststoffschalungen, mit denen sich anspruchsvolle Betonoberflächen an den verschiedensten Ausführungen herstellen lassen. Mit dem elastischen Abguss lassen sich Sondertexturen für die Schalungen erzielen. Diese Matrizen bestehen durchgehend aus gummielastischen Kunststoffen (Elastomere) oder wärmehärtenden Kunststoffen (Thermoplastik) [3] [4].

Weitere Möglichkeiten für die Schalungen wären zum Beispiel Filtervliese und OSB-Platten (siehe Abbildung 2.6).



Abbildung 2.5 Schalungsmatrizen [4]



Abbildung 2.6 Betonoberfläche mit Gummi-Matrize texturiert und schwarz gestrichen – Universitätsbibliothek in Utrecht, 2004, Architekt: Weil Arets, Maastricht (links) und OSB-Platten geschaltete Oberfläche mit Kante (rechts) [3]

### *Einsatz von Betonfarben*

Durch den Einsatz von Farbe lassen sich unterschiedliche optische Effekte erzielen. Als Kriterien zur Auswahl der Farbe an der Fassade des Objektes können folgende Parameter betrachtet werden [1]:

- Hohe Gleichmäßigkeit
- Leichte oder stärkere farbliche Unterschiede

Mit den folgenden Maßnahmen kann der Beton farblich gestaltet werden:

- Unterschiedliche Zementsorten
  - Portlandzement ist mittelgrau bis dunkelgrau
  - Portlandölschieferzement ist rotbraun
  - Weißzement ist annähernd weiß
  - Einsatz von Farbpigmenten meist in Verbindung mit Weißzement
- Farbige Zuschläge
  - Basalt – schwarze Farbe
  - Eisen und Kupfer – grün und bräunlich
- Zusätze
  - Mit Glas, Marmor und Kalkstein werden weitere Effekte erreicht [2]

### *Bearbeitung der Betonoberfläche*

Mit einer nachträglichen Bearbeitung der fertigen Betonoberfläche, kann eine besondere Wirkung erzielt werden. Die Betonfläche kann dabei entweder im Rahmen der Herstellung, (Waschen, Säuern oder Strahlen) oder erst wenn der Beton seine Festigkeit bereits entwickelt hat (Stocken, Spitzen, Scharrieren, Polieren etc.), bearbeitet werden.

Bei den Fertigteilflächen wird das Verfahren Waschen, Säuern und Strahlen mit gleichmäßigem Erfolg durchgeführt, hingegen führt dieses Verfahren bei den Ort betonbauteilen eher ungleichmäßigen Ergebnissen (sehr porig und im Grunde nicht prognostizier- und wiederholbar) [5].

### Anforderungen, Klassifizierung

Bei der Gestaltung der Sichtbetonfassaden ist es wichtig zu wissen, ob es auf der Baustelle Betonfertigteile oder Transportbeton zum Einsatz kommen. Abhängig davon, werden Produktionsart und Verarbeitung des Betons festgestellt, aber auch andere wichtige Eigenschaften, die bei der Gestaltung eine Rolle spielen [1]. Besondere Anforderungen an derartige Betonflächen werden hinsichtlich der Herstellung und des Aussehens gestellt. Wie o.a. spielt hierbei die Schalung eine wichtige Rolle, um die gewünschte Ansichtsfläche zu erzielen.

Neben der allgemeinen Forderungen nach einem geschlossenen und gleichmäßigen Betongefüge, die für jede Betonfläche gilt, können an geschalte Betonflächen zusätzlich

- die Anforderungen eines bestimmten Aussehens zur architektonischen Gestaltung,
- bautechnische Anforderungen (z.B. glatte Deckenuntersicht für nachfolgenden Anstrich) und
- betontechnologische Anforderungen (z.B. Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegen Frost-Tausalz- oder chemischen Angriff durch möglichst porenfreie Betonfläche)

gestellt werden [7].

Die Beschreibung der technischen und gestalterischen Anforderungen an das fertige Sichtbetonbauwerk bzw. dessen Bauteile lassen sich in zwei Arten unterteilen [7]:

1. **Klassenbildende Anforderungen**, die die Qualität von geistigen oder handwerklichen Leistungen oder/und von Material und Hilfsstoffen beschreiben, wie z.B. Qualität der Planung oder des Betons. Dabei gibt es folgende Anforderungsklassen:
  - Anforderungsklasse PQ: Anforderungen an die Bauteilbeschreibung (Planung und Ausschreibung).
  - Anforderungsklasse BQ: Anforderungen an den Beton mit Auswirkungen auf die Betonfläche.
  - Anforderungsklasse AQ: Anforderungen an die Bauausführung.
  - Anforderungsklasse SQ: Anforderungen an das Schalungsmaterial und den Trennmittleinsatz
2. **Nicht klassenbildende Anforderungen (zusätzliche Einzelanforderungen)**, die unabhängig von der Anforderungsklasse maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis haben, wie z.B. Schalungssystemen oder Textur der Betonfläche. Dabei gibt es folgende Einzelanforderungen:
  - Farbe der Betonfläche
  - Kantenausbildung, Ankerlöcher, Aufhängestellen, Ankerstellen
  - Schalungssystem, Textur der Betonfläche

Die Beschreibung des Sichtbetons bzw. der Betonfläche wird auf folgender Weise durchgeführt [7]:

- **Beschreibung mit Anforderungsklassen**  
Die Sichtbetonklassen (SB1 bis SB3) und die damit beschriebenen Anforderungen an die Betonfläche stellen Empfehlungen dar, welche die Mehrheit der Einsatzfälle abdecken sollen.
- **Beschreibung mit Einzelkriterien**  
Besondere Anforderungskombinationen können im Rahmen einer Sonderklasse (SBS) abgedeckt werden.
- **Beschreibung ohne Angaben von Anforderungen**  
Wird die Richtlinie ohne weitere Angaben vertraglich vereinbart, gelten die Anforderungen von SB1 als vereinbart.

Folgende Bezeichnungen werden bei der Beschreibung der Gesamtqualität des Sichtbetonbauwerks verwendet:

- C – Farbe
- K – Kantenausbildung
- AS - Ankerstelle
- AV – Verschluss der Ankerlöcher
- AH – Ausbildung von Aufhängestellen
- SY - Schalungssystem
- T - Textur

In der nachstehenden Tabelle werden die Gesamtanforderungen an das Sichtbetonbauwerk zusammengefasst.

Tabelle 2.1 Sichtbetonklassen SB – Gesamtanforderung an das Sichtbetonbauwerk (die klassenbildenden Anforderungen sind grau hinterlegt) [7]

Sichtbetonklasse	Beispiel Betonfläche mit gestalterischen und/oder technischen Anforderungen	Anforderungsklasse Bauteilbeschreibung (PQ, Tab. 5/72)	Anforderungsklasse Betonfläche (BQ, Tab. 5/3)	Farbe (C, Tab. 5/3/2)	Anforderungsklasse Bausführung (AQ, Tab. 5/4)	Kantenausführung (K, Tab. 5/4/2)	Ankerstelle (AS, Tab. 5/4/2)	Verschluss der Ankerlöcher (AV, Tab. 5/4/2)	Ausbildung von Aufhängestellen (AH, Tab. 5/4/2)	Anforderungsklasse Schalungsmaterial, Trennmittelsatz (SQ, Tab. 5/5)	Schalungssystem (SY, Tab. 5/5/2)	Textur der Betonfläche (T, Tab. 5/5/2)	Musterfläche	Sichtbetonteam
SB1	geringen Umfangs, überwiegend technische Anforderungen im Industrie- und Tiefbau	PQ1	BQ1		AQ1					SQ1				nicht erforderlich
SB2	normalen Umfangs, z.B. einfache Fassaden in Hochbauten, Sichtflächen im Industriebau mit großem Betrachtungsabstand	PQ2	BQ2	C1 C2 oder C3	AQ2	K1 oder K2	AS1 AS2 oder AS3	AV1 oder AV2	AH1 oder AH2	SQ2	SY1 SY2 oder SY3	T1 T2 oder T3	empfohlen	empfohlen
SB3	hohen Umfangs, z.B. repräsentative Oberflächen oder komplexe Fassaden in Hochbauten	PQ3	BQ3		AQ3					SQ3			erforderlich	erforderlich
SBS	sämtliche Einzelanforderungen aller Anforderungsklassen und sämtliche nicht klassenbildende Anforderungen sind festzulegen, die Verwendung von definierten Anforderungsklassen ist möglich, Abänderungen innerhalb der Anforderungsklassen sind unzulässig													

## Einsatz in Fassaden

Sichtbetonfassaden kommen bei zahlreichen Projekten zum Einsatz [8]:

- Privater Hausbau
- Mehrparteienhäuser
- Bürogebäude
- Kirchenfassaden
- Öffentliche Gebäude



Abbildung 2.7 Wohnhäuser in Herrliberg am Zürichsee, 2005, Architekten: Burkhalter Sumi, Zürich [3]



Abbildung 2.8 Ibero Camargo Foundation in Porto Alegre, 2006, Architekt: Alvaro Siza Vieira, Porto [3]

### Fassaden aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC)

Der UHPC kommt vor allem bei der Sanierung und Verstärkung von Brückenbauwerken zum Einsatz. Dadurch lassen sich schlanke Bauteile bei gleicher Tragfähigkeit erreichen und gleichzeitig können Eigenlasten minimiert werden. Im Hochbau findet UHPC bei filigranen Fassadenelementen oder tragenden Bauteilen Anwendung. Beispiele sind etwa das Museum der Zivilisationen Europas und des Mittelmeeres in Marseille oder die Galerie Foksal in Warschau [12].



Abbildung 2.9 MuCEM in Marseille links und Fassadendetail (rechts) [Quelle: pinterest.com]

Das *Mucem* (Musée des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée) befindet sich im südfranzösischen Marseille im Alten Hafen und wurde vom französischen Architekten Rudy Ricciotti geplant. Es ist ein quaderförmiger Bau mit netzartiger Betonhülle. Das Besondere an diesem Gebäude ist seine gitterartige Fassade. Das Gitter besteht aus insgesamt 384 Betonpaneelen, die mit einer jeweiligen Größe von 3,00 x 6,00 Metern wie ein gigantisches Puzzle zusammengesetzt worden sind [12]. Diese Paneele sind nur zehn Zentimeter stark und bestehen aus Ultrahochleistungsbeton. Die Gitterplatten sind Fuge auf Fuge übereinandergesetzt und die Lastabtragung erfolgt über punktuelle Kontakte. Das Gitterwerk wird mit unzähligen Edelstahlstäben gehalten. Diese Stahlstäbe sind mit schlanken Betonstützen in Form eines baumartigen Gerüsts verbunden. Die Betonstützen sind ebenfalls aus UHPC hergestellt worden.

## 2.2 Glasfaserbeton

### Eigenschaften

Glasfaserbeton (GFB) ist ein mit alkaliresistenten Glasfasern (AR-Fasern) verstärkter Beton. Dem Beton werden Kurzfasern zugesetzt und man unterscheidet je nach Faseranteil zwischen glasfasermodifizierten Beton und Glasfaserbeton. Glasfaserbeton besteht zu 90 Prozent aus Sand und Wasserzement, wobei der Glasfaseranteil von 2,5 bis 5 % des Gesamtvolumens beträgt. Der Rest sind Pigmente und Betonzusatzstoffe.



Abbildung 2.10 Ultrahochfester Glasfaserbeton [Quelle: heinze.de]

### Einsatz in Fassaden

Im Fassadenbau wird Glasfaserbeton in Form von Paneelen verwendet. Da die Paneele robuste Eigenschaften aufweisen, halten sie hohen Belastungen bei einer minimalen Dicke und Plattengröße stand. Im Produktionsprozess wird der Glasfaserbeton relativ fließfähig eingestellt, was die Herstellung von zwei- und dreidimensionalen Formteilen ermöglicht.

Es gibt verschiedene Fassadensysteme aus Glasfaserbeton-Paneelen, die meist für vorgehängte, hinterlüftete Fassaden verwendet werden. Im Folgenden werden einige innovative Lösungen dargestellt.

### Material „fibreC“

„fibreC“ ist ein mit Glasfaser verstärkter Beton vom Hersteller „Rider“. Die technischen Eigenschaften, seine Qualität und Langlebigkeit ermöglichen vielfältige Anwendungen des Naturproduktes. Dieses Material weist folgende Eigenschaften auf [9]:

- *Hohe Performance*  
Das Material hält auch der höchsten Belastung stand, ist langfristig beständig und ist weiterhin individuell einsetzbar. In allen Klimazonen bleiben, laut Angaben, die technischen Eigenschaften bis zu 50 Jahre erhalten.
- *Individuelle Gestaltung*  
Es sind zahlreiche ungewöhnliche und komplexe Gestaltungsvarianten möglich (Farbe, Textur, Oberfläche, Druck, Perforierung und Formen).
- *Brandschutz*  
Absolute Brandbeständigkeit: Brandverhaltensklasse A1 (nicht brennbar)
- *Siliciumdioxid frei*  
„fibreC“ ist frei von kristallinem Siliciumdioxid (<1M-%)

- **Passiver Solarbeitrag und Verschattung**  
Das Material stellt eine effektive und innovative Methode zum Kühlen und Erwärmen von Fassaden dar. Bei einer Gebäudehülle aus "fibrec" tritt kein "Heat Island Effect" auf.
- **Öko-Effizienz**  
Sehr geringer Verbrauch der fossilen Primärenergie bei der Produktion von Glasfaserbeton (siehe Abbildung 2.11).

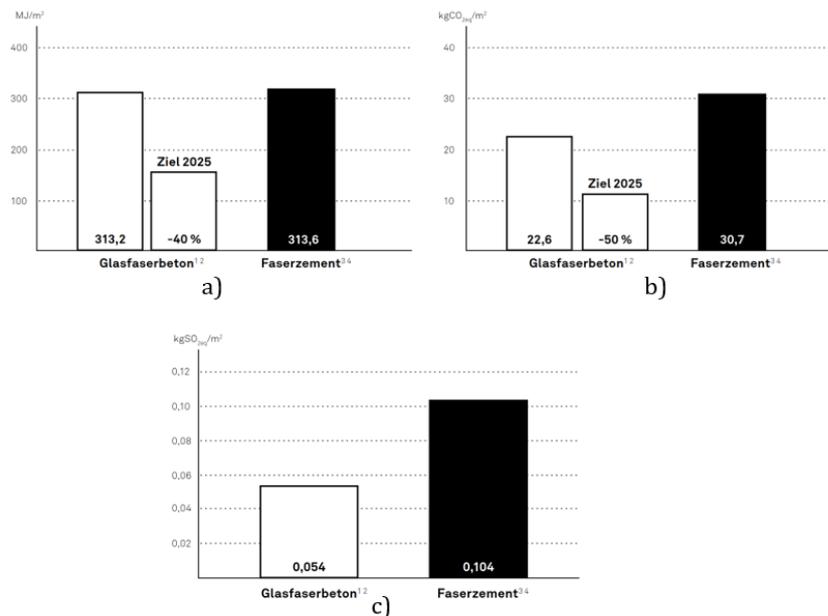


Abbildung 2.11 Äquivalenzfaktoren (Umweltindikatoren): a) Primärenergie (PENRT); b) globale Erwärmung (GWP); c) Versäuerung (AP) [9]

In der Tabelle 2.2 sind die physikalischen Eigenschaften des Materials „fibrec“ zusammengestellt.

Tabelle 2.2 Physikalische Eigenschaften des Materials „fibrec“ [9]

<b>Eigenschaften</b>		
Toleranzen Planlage bis 0,6   1,2   2,4   3,6 m	± 2 mm   ± 4 mm   ± 6 mm   ± 8 mm	
Rohdichte (13 mm)	2,0 - 2,42 kg/dm <sup>3</sup>	EN 12467
Biegezugfestigkeit	> 18 N/mm <sup>2</sup>	EN 12467, Klasse 4
E-Modul für Verformungsberechnung	ca. 10.000 N/mm <sup>2</sup>	
E-Modul für Zwängungsberechnung	ca. 30.000 N/mm <sup>2</sup>	
Eigenlast/Flächengewicht (13 mm)	26 - 31,5 kg/m <sup>2</sup>	
Wärmeausdehnungskoeffizient	ca. 10 x 10 <sup>-6</sup> 1/K	DIN 51045
Klassifizierung des Brandverhaltens	A1 - nicht brennbar   A2-s1,d0 - nicht brennba	EN 13501-1
Temperaturstabilität	je nach Kernfeuchte bis 350 °C	
Spezifische Wärmekapazität	ca. 1.000 Joule/(kg*K)	
Wärmeleitfähigkeit	Lambda: ca. 2,0 W/(m*K)	
Feuchtedehnung	0,05%	EN 12467

Aus diesem Material werden folgende Produkte hergestellt:

### *concrete skin*

Es handelt sich um 13 mm dünne und sehr leistungsfähige Platten, die hohen Belastungen standhalten kann. Zu ihren Eigenschaften zählen die Witterungsbeständigkeit und eine hohe Lebensdauer. Große Plattengrößen, individuelle Formen, Farben, Texturen, Oberflächen und Perforierungen bieten vielfältige Anwendungs- und Formmöglichkeiten. Es sind sichtbare (Niete, Schrauben) oder verdeckte (Hinterschnittanker, Rider Power Anchor, Kleben) Befestigungen möglich. Mit diesen Platten wurde die Fassade des LLC Library and Learning Centers der Universität Wien realisiert.



Abbildung 2.12 Fassadenplatten des LLC Library and Learning Center, Universität Wien, Österreich [9]

### *öko skin*

Es handelt sich um Betonfassaden im Lattenformat. Die Montage ist sehr einfach und die Platten müssen im Vergleich zum Holz nie gestrichen oder geschliffen werden. Die Platten sind sehr geeignet für großflächige Gebäudefassaden. Die Platten können auf eine sichtbare (Niete, Schraube) oder eine verdeckte Art (öko skin hidden fix, Kleben, Hinterschnittanker, Rieder Power Anchor) befestigt werden.



Abbildung 2.13 Melis Stokelaan, Den Haag, Niederlande [9]

*formparts*

Monolithisch wirkende Betonlamellen, die eine hohe Flexibilität und vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten von Architekturbeton bieten. Ein Vorteil dieser Lamellen ist eine witterungsunabhängige Vormontage der Einzelstücke im Werk. Dadurch wird eine rasche Montage an der Baustelle ermöglicht. Befestigungen sind sowohl sichtbar (Niete, Schrauben) als auch verdeckt (Hinterschnittanker, Rieder Power Anchor, Kleber) möglich. Diese Lamellen ermöglichen komplexe 3D-Formen mit runden und scharfkantigen Ecklösungen.

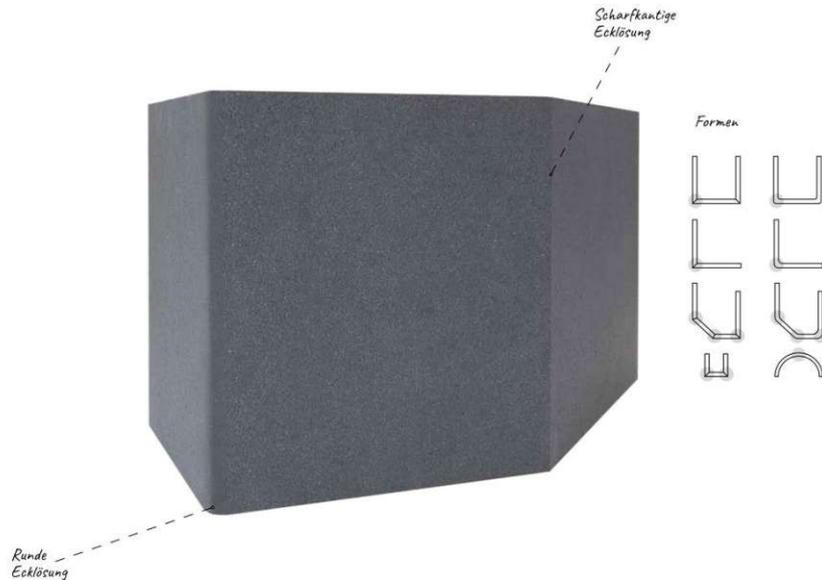


Abbildung 2.14 „formparts“ Betonlamellen [9]

*cast – dreidimensionalen Elemente*

Die dreidimensionalen Elemente werden an das gewünschte Design der Architekten angepasst. Die Elemente sind in beidseitiger Sichtbetonqualität. Durch die hohe Wiederholbarkeit der produzierten Elemente ist eine wirtschaftliche Lösung für die gesamte Fassade möglich.



Abbildung 2.15 cast-dreidimensionale Fassade, Wohngebäude Lontoonkatu, Helsinki, Finnland [9]

## Befestigungsmöglichkeiten

### Hinterschnittanker

Die Paneele werden mit Metallagraffen oder alternativen projektspezifischen Unterkonstruktionen und speziellen Hinterschnittankern nicht sichtbar auf der Rückseite formschlüssig befestigt (siehe Abbildung 2.16) [9].

### Rieder Power Anchor

Die Paneele werden mit Metallagraffen oder alternativen projektspezifischen Unterkonstruktionen und speziellen Rieder Power Anchor nicht sichtbar auf der Rückseite formschlüssig befestigt (siehe Abbildung 2.16) [9].

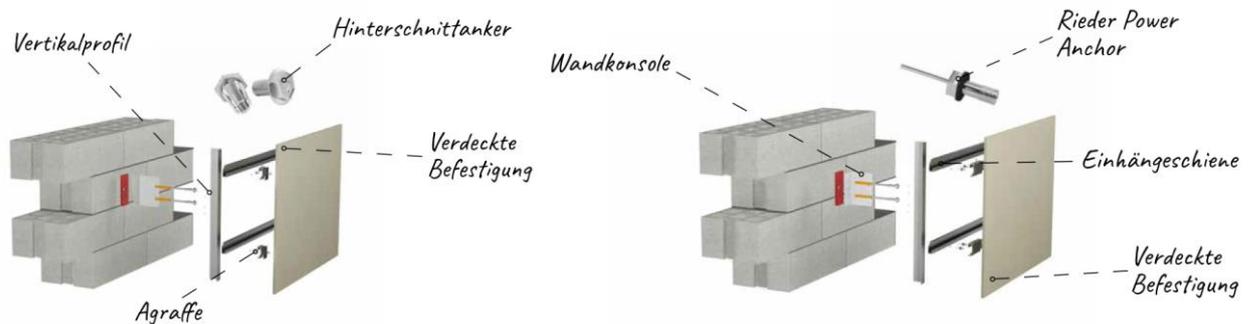


Abbildung 2.16 Befestigung mit Hinterschnittankern (links) und mit Rieder Power Anchor (rechts) [9]

### Kleben

Die Paneele können mittels Verklebung nicht sichtbar auf einer Aluminium-Unterkonstruktion kraftschlüssig befestigt werden (siehe Abbildung 2.17) [9].

### Niete

Die Paneele können mit Nieten auf einer Metall-Unterkonstruktion formschlüssig befestigt werden. Die Unterkonstruktion besteht vorzugsweise aus vertikalen Profilen, die mittels Wandkonsolenhalter an der Wand montiert sind (siehe Abbildung 2.17) [9].

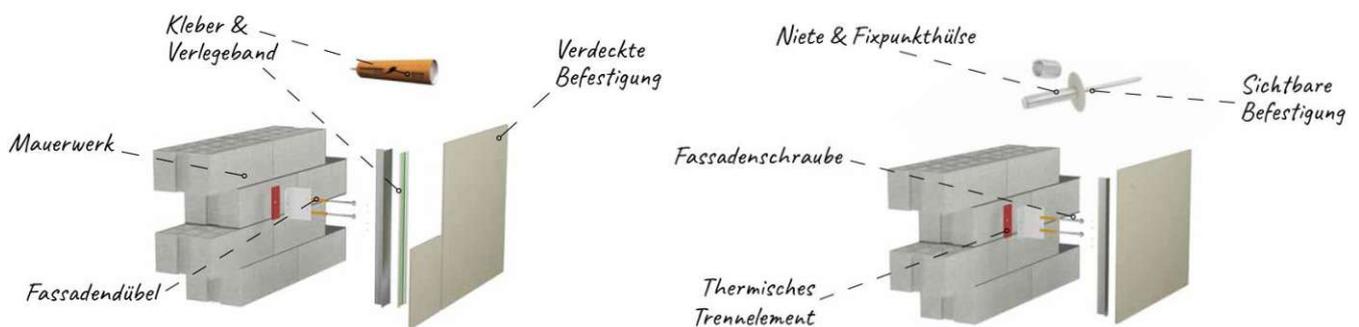


Abbildung 2.17 Befestigung mit Kleben (links) und mit Nieten (rechts) [9]

## 2.3 Faserzement

### Eigenschaften

Faserzement ist ein moderner, armierter Werkstoff aus natürlichen und umweltneutralen Rohstoffen [10]. Nach einer Aushärtezeit von 28 Tagen besteht der Faserzement aus Portlandzement (40%), Zusatzstoffe (11%), Armierungsfasern (2%), Prozessfasern (5%), Wasser (12%) und Poren (30%). Die Dichte beträgt 1600 bis 1850 kg/m<sup>3</sup> [11]. Die Fasern übernehmen eine ähnliche Funktion wie der Stahl im Stahlbeton. Dank der mikroskopisch kleinen Luftporen ist das Material frostbeständig. Dennoch ist es wasserdicht, UV-beständig, fäulnissicher und nicht brennbar [12]. Zur Armierung werden synthetische, organische Fasern aus Polyvinylalkohol oder Polyacrylnitril und Prozessfasern (Zellstoff) verwendet. Die früher verwendeten Asbestfasern wurden bereits vor langer Zeit ersetzt.



Abbildung 2.18 Zellstoff-Faser und Zementfaserplatte als Produkt [10]

### Einsatz in Fassaden

Aus Faserzement werden die hochverdichteten Faserzementplatten in einer Materialdicke zwischen 8 und 12 mm hergestellt. Herstellerabhängig werden unterschiedliche Größen, Formen und Farben produziert. In Fassaden finden die Platten Einsatz in den folgenden Bereichen:

- Vorgehängte, hinterlüftete Außenwandbekleidung
- Ausfachungen in Pfosten-Riegel-Konstruktion
- Stülpchalung (kleinformatige Faserzementplatten)
- Äußere Bekleidung von Sandwichelementen
- Balkonbekleidungen

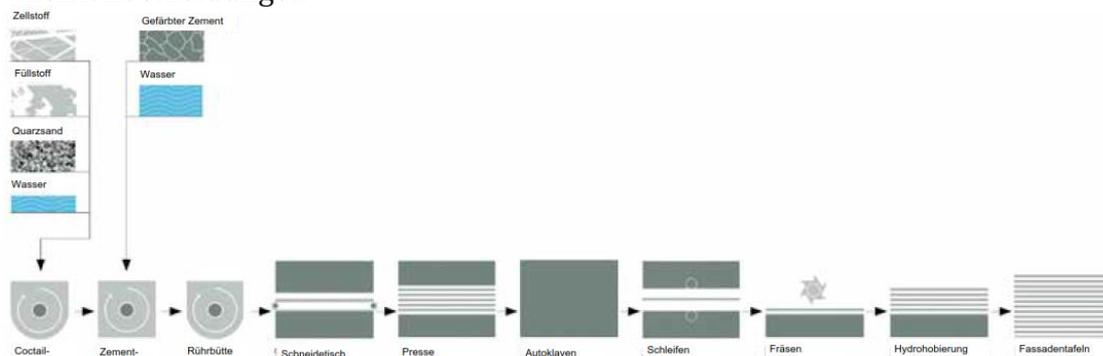


Abbildung 2.19 Ablaufdiagramm für die Herstellung von großformatigen Fassadentafeln im "Hatschekverfahren" [Quelle: equtone.de]

In der folgenden Tabelle sind die technischen Daten der Faserzementplatte „linea“ vom Hersteller „Equotone“ dargestellt [10].

Tabelle 2.3 Technische Daten der Faserzementplatte „linea“

<b>Eigenschaften</b>	
Rohdichte	$\geq 1,50 \text{ g/cm}^3$
Biegefestigkeit	II 18 N/mm <sup>2</sup> , 28 N/mm <sup>2</sup>
Elastizitätsmodul	ca. 12.000 N/mm <sup>2</sup>
Temperaturdehnzahl	$\alpha_t = 0,01 \text{ mm/mK}$
Feuchtigkeitsdehnung	1,60 mm/m (0° bis 100° rel. Luftfeuchtigkeit)
Frostbeständigkeit	gem. DIN EN 12467
Klassifizierung des Brandverhaltens	A2-s1, d0 (DIN EN 13501-1)
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = \text{ca. } 0,39 \text{ W/mK}$
Maßtoleranzen	Länge, Breite $\pm 3 \text{ mm}$



Abbildung 2.20 Faserzementtafeln: 1) "linea", matte, profilierte Oberfläche; 2) "tectiva" matte, geschliffene Oberfläche [13]



Abbildung 2.21 Faserzementtafeln am Objekt OD, TU Wien

## Befestigungsmöglichkeiten

Die Fassadentafeln benötigen eine Unterkonstruktion. Diese können aus Holz oder Aluminium sein und sollten auch eine thermische Trennung zum tragenden Untergrund aufweisen. Es gibt mehrere Befestigungsmöglichkeiten, hier werden einige dargestellt.

### Unterkonstruktion aus Holz

Die Fassadenbekleidung wird mit Befestigungselementen an der Traglattung befestigt. Die Traglattung wird durch Verbindungselemente mit der Konterlattung verbunden und die Konterlattung wird durch Verankerungselemente im Wanduntergrund verankert. Für größere Dämmstoffdicken kann die vertikale Traglattung durch metallische Winkel- bzw. U-Abstandhalter mit einem thermischem Trennelement aufgeständert werden [10].

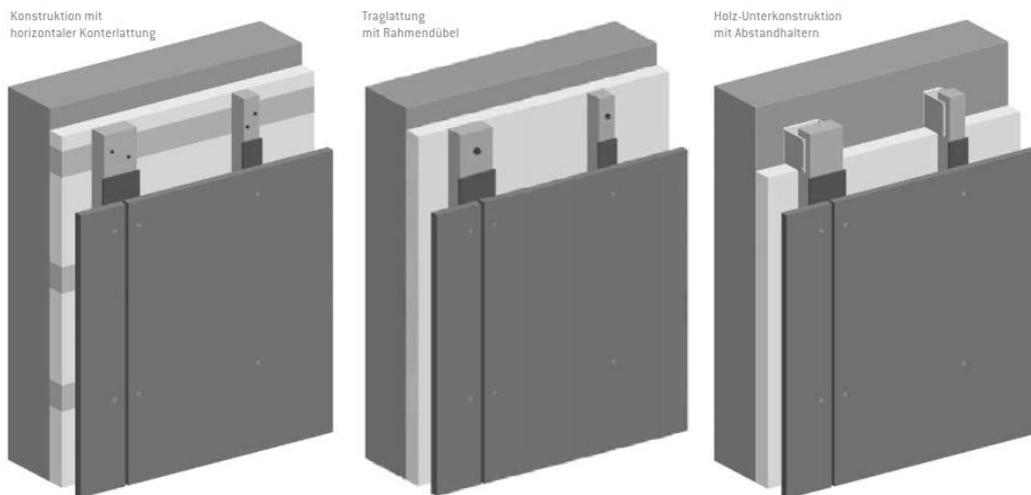


Abbildung 2.22 Befestigung an die Unterkonstruktion aus Holz [13]

### Unterkonstruktion aus Aluminium

Zur Aufnahme der Bekleidung werden neben Holz verschiedene Unterkonstruktionen aus Aluminium und Edelstahl verwendet. Ihre Standsicherheit ist in der Regel anhand der vorliegenden technischen Bestimmungen rechnerisch nachzuweisen. Die Befestigung der Fassadentafeln auf einer Aluminium-Unterkonstruktion erfolgt mit Universal-Niete. Es werden farbige Nietköpfe, die im Farbton der Fassadentafeln angepasst sind, eingesetzt. Dadurch entsteht eine harmonische Optik der Fassade.

### Bemessung

Für den Standsicherheitsnachweis der großformatigen Fassadentafeln und ihrer Befestigungen müssen die Schnittlasten, insbesondere die maximalen Biegemomente und die Auflagerreaktionen berechnet werden. Die Nachgiebigkeit der Aluminium-Unterkonstruktion ist statisch zu berücksichtigen.

Beim Lastfall „Winddruck“ wird die Last linienförmig durch die Unterkonstruktion aufgenommen, dagegen wird der Lastfall „Windsog“ durch eine punktgestützte Platte modelliert.

Zusammenfassend kann angegeben werden, dass Faserzementplatten eine gebräuchliche Art der Fassadengestaltung darstellen.

## 2.4 Acrylstein - Corian®

Acrylstein ist die hersteller- und markenunabhängige Bezeichnung für ein Material, welches als Plattenmaterial oder Formguss im Innenausbau, bei der Möbelherstellung und dem Hygienebereich (z. B. Küchenarbeitsplatten, Waschbecken) verwendet wird [11].

### Eigenschaften

Es wird zwischen zwei Arten von Mineralwerkstoffen unterschieden: acrylgebundene und polyestergebundene. Infolge der unterschiedlichen Zusammensetzung weisen beide Gruppen jeweils spezifische Eigenschaften auf und sind daher für unterschiedliche Anwendungen geeignet [14].

Während polyestergebundene Mineralwerkstoffe eine Verwendung im Innenausbau von Objekt- und Wohnbau finden, werden acrylgebundene Mineralwerkstoffe meistens für Fassadenverkleidungen verwendet. Sie setzen sich zu ca. 1/3 aus Acryl und zu ca. 2/3 aus natürlichen Mineralien sowie Pigmenten mit den Hauptbestandteil Aluminiumhydroxid zusammen [14].

Folgende Eigenschaften machen acrylgebundene Mineralwerkstoffe geeignet für Fassadenverkleidungen [14]:

- Hoher Widerstand gegen Witterungseinflüsse und UV-Verfärbungen
- Hohe Stoßfestigkeit schützt vor Abnutzung und Vandalismus
- Einfache Reinigung – sogar von Graffiti
- Schwer entflammbar
- Porenlose hygienische Oberfläche
- Thermisch verformbar für 3D-Konzepte
- Homogene Optik und große Farbvielfalt
- Transluzenz für Licht- und Oberflächeneffekte
- Schnelle Installation und einfache Instandsetzung



Abbildung 2.23 Verschiedene Muster- und Farbproben von Corian auf hellem Corian-Untergrund [11]

### Einsatz in Fassade

Acrylstein wird seit einigen Jahren zur Fassadengestaltung eingesetzt. Der übliche Einsatz von Acrylstein ist bei vorgehängten und hinterlüfteten Fassaden. Von Vorteil ist dabei das geringe Gewicht des Werkstoffs, so dass auch der Einsatz groß dimensionierter Paneele mit Höhen von bis zu 5m möglich ist [14]. Da dieser Werkstoff eine hervorragende Achsensteifigkeit und eine Biegefestigkeit (zwischen 50 und 78 MPa nach DIN EN ISO 178 abhängig von der Plattendicke und Hersteller) aufweist, sind die Acrylsteinplatten bei hohem Winddruck gut geeignet. Aufgrund der thermoplastischen Eigenschaften kann acrylgebundener Mineralwerkstoff bei Temperaturen zwischen 160 und 175 °C beliebig verformt werden, was diesen Werkstoff perfekt für anspruchsvolle Corporate Architecture Projekte macht. Ein anschauliches Beispiel dafür ist der Leonardo Glass Cube in Bad Driburg. [14]. Es gibt verschiedene Varianten von Acrylstein bzw. Mineralwerkstoff, die sich meist durch ihre Zusammensetzung geringfügig unterscheiden. Einige der bekanntesten Herstellermarken sind „Corian®“, „H-Stone®“, „Ceramilux®“ oder „Cristalplant®“ biobased.



Abbildung 2.24 Leonardo Glass Cube in Bad Driburg [41]

Der Leonardo Glass Cube in Bad Driburg wurde vom deutschen Designstudio 3deluxe entworfen und von der Roskopf + Partner AG, Obermehler, realisiert [41]. Bei diesem Projekt wurde weltweit erstmals ein Mineralwerkstoff erfolgreich eingesetzt. Es handelt sich um einen Acrylstein vom Hersteller „HI-MACS®“. Der Werkstoff weist hohe Formbarkeit, Beständigkeit, Porenfreiheit und Undurchlässigkeit auf, was es ideal für die Herstellung von Fassaden und Außenwandverkleidungen mit großer ästhetischer Wirkung macht. Dank der hervorragenden und thermischen Formbarkeit wird die Gestaltung jeder beliebigen dreidimensionalen Form möglich. Da sich das Material durch Erhitzen in jede beliebige Form biegen lässt, wurde die Gestaltung von Wellenlinien und futuristischen Kurven beim Leonardo Glass Cube möglich. All diese Eigenschaften machen dieses Material ideal für die Anwendung in der dekonstruktivistischen Architektur.

Die Skulpturale, weiße Strukturen (sogenannte „genetics“) machen dieses Objekt zu einem herausragenden Highlight. Diese Strukturen verknüpfen separate Gebäudezonen miteinander und tauchen auf der Fassade erneut in zweidimensionaler Form auf. Sowohl die spektakulären Streben der Fassade als auch die organischen Säulen im Innenraum sind aus weißem „HI-MACS®“ gefertigt und thermisch auf Maß geformt [41]. Der Leonardo Glass Cube wurde auf der Messe „Surface Show“ 2008 in Las Vegas mit zwei Preisen in den Kategorien „Freestyle/Kunst“ und „Best in Show“ ausgezeichnet.

*Corian Fassadenplatte nach ETA-18/0388*

Die „Corian Fassadenplatte“ ist eine Mineralwerkstoffplatte aus einem Drittel Acrylharz und zwei Drittel natürlichem mineralischem Aluminiumhydroxid mit einer weißen Farbe und einer Dicke von 12mm [16]. Der Corian Fassadenbausatz für hinterlüftete Außenwandbekleidung umfasst:

- Bekleidungs-element: Corian-Fassadenplatte „Corian EC Glacier Weiß“, max. Standardformate der acrylgebundenen Fassadenelemente 1500x3680x12 mm (Verwendung kleinerer Plattenformate möglich),
- Befestigungsmittel für die Bekleidung: KEIL Hinterschnittanker KH 7,0 nach ETA-13/0377

Die Prüf- und Bewertungsmethoden, die der ETA zu Grunde liegen, führen zur Annahme einer Nutzungsdauer des Corian Fassadenbausatzes von mindestens 25 Jahren. Die Angabe der Nutzungsdauer kann nicht als eine Garantie des Herstellers verstanden werden, sondern ist lediglich ein Hilfsmittel zur Auswahl des richtigen Produkts in Bezug auf die angenommene wirtschaftlich angemessene Nutzungsdauer des Bauwerks [16].

Tabelle 2.4 Corian EC Glacier White - Abmessungen, Materialien und physikalische Eigenschaften [15]

Corian Fassadenplatten		Corian EC Glacier White
Dicke	$t =$ [mm]	12*
Länge	$l =$ [mm]	1500*
Breite	$w =$ [mm]	3658*
Farberkennung		Glacier white
Schüttdichte	$\rho =$ [KN/m <sup>3</sup> ]	17,5
Wärmeoeffizient <sup>3)</sup>	$\alpha_T =$ [1/K]	$30,4 \times 10^{-6}$
Mittelwert des Elastizitätsmoduls	$E_{\text{mean}} \geq$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8500
Biegefestigkeit (nach EN ISO 178:2013-09)	$\sigma_{u5\%}^{1)} \geq$ [N/mm <sup>2</sup> ]	61
Biegefestigkeit (nach EN ISO 178:2013-09)	$\sigma_{B,\text{min}}^{2)} =$ [N/mm <sup>2</sup> ]	60

\* Breiten- und Längentoleranzen +0,5 mm; Dickentoleranzen  $\pm 0,3$  mm

<sup>1)</sup> 5%-Quantil bei einem Konfidenzniveau von 75 % und unbekannter Standardabweichung

<sup>2)</sup> der minimale Einzelwert der Fassadenplatte

<sup>3)</sup> Nach den Angaben des Herstellers

In den nachstehenden Tabellen werden die Einflüsse der Temperaturschwankungen, des Frost-Tau-Wechsels und der UV-Belastungen auf die Biegeeigenschaften der Corian Fassadenplatte „Corian EC Glacier White“ dargestellt.

Tabelle 2.5 Auswirkungen von Temperaturschwankungen auf die Biegeeigenschaften der Corian Fassadenplatten – Verhältnis für den Einfluss der Temperatur [15]

Effekte von Temperatur	Prüfungen nach EN ISO 178	Biege- festigkeitsverhältnis $\sigma_B$	Biege- Modulverhältnis $E_B$
	T= -20° C	1,238	1,127
	T= +60° C	0,82	0,787
	T= +80° C	0,648	0,625

Tabelle 2.6 Effekte von Frost-Tau-Wechsel auf die Biegeeigenschaften der Corian Fassadenplatte – Verhältnis der Effekte von Frost-Tau-Wechsel [15]

Effekte von Frost-Tau- Wechsel	Prüfungen nach EN 12467	Biege- festigkeitsverhältnis $\sigma_B$	Biege- Modulverhältnis $E_B$
	100 Frost - Tau - Wechsel		0,962

Tabelle 2.7 Effekte von UV-Belastungen auf die Biegeeigenschaften der Corian Fassadenplatte – Verhältnis der Effekte von UV-Belastungen [15]

Effekte von UV-Belastungen	Tested acc. EN ISO 4892-2	Biege- festigkeitsverhältnis $\sigma_B$	Biege- Modulverhältnis $E_B$
	Accelerated ageing 3000 h (UV + humidity)	0,937	0,97
	Method A, Wechsel 1, 1500 h, 4500 h, 6000 h Ungünstigste Verhältnisse	0,819	0,958

Es kann festgestellt werden, dass die Biegefestigkeitsverhältnisse mit der Steigerung der Temperatur sinken.

## Befestigungen

Für die Befestigung der Corian Fassadenplatten wird ein „KEIL Hinterschnittanker KH 7,0“ nach ETA-13/0377 verwendet. Es handelt sich um einen Spezialanker aus nichtrostendem Stahl, der aus einer kreuzweise geschlitzten Ankerhülse mit einer Innengewinde M6, an deren oberen Ende ein Sechskant geformt ist, und einer zugehörigen Sechskantschraube mit angerollter Sperrzahlkopf-Scheibe, besteht [15].

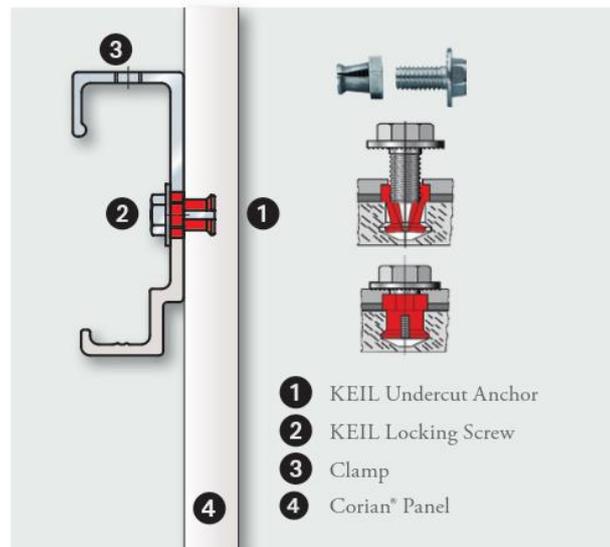


Abbildung 2.25 KEIL Anker [16]

Die Unterkonstruktion muss so ausgebildet werden, dass die Fassadenplatten technisch zwängungsfrei über Gleitpunkte (freie Lager) und einen Festpunkt (festes Lager) befestigt sind. Der Festpunkt darf am Plattenrand oder im Plattenfeld angeordnet werden [15]. Als Unterkonstruktion werden vertikale und horizontale Tragprofile angeordnet. Das horizontale Tragprofil wird meistens aus verstellbarem Aluminium hergestellt. In der folgenden Abbildung ist ein Befestigungssystem für „DuPont Corian“ Fassadenplatten dargestellt.

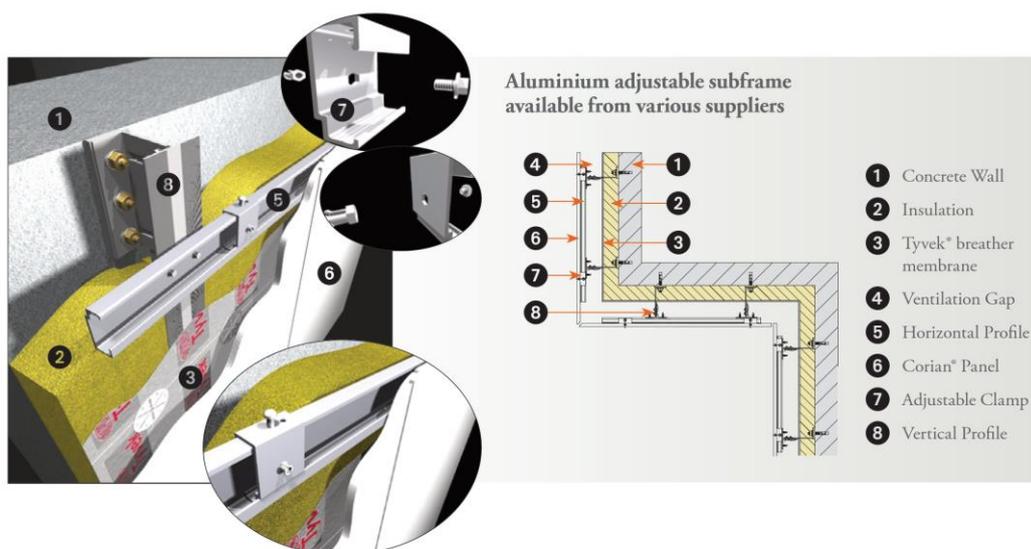


Abbildung 2.26 Befestigung für "DuPont Corian" Platten [16]

## 2.5 Keramik

Der Begriff Keramik ist heute breit gefasst. Keramiken sind weitgehend aus anorganischen, feinkörnigen Rohstoffen unter Wasserzugabe bei Raumtemperatur geformt und danach getrocknete Gegenstände, die in einem anschließenden Brennprozess oberhalb 900 °C zu harten, dauerhaften Gegenständen gesintert werden [17].

### Eigenschaften und Einsatz in Fassaden

Keramische Werkstoffe für Fassaden bestehen aus tonmineralischen Stoffen wie Feldspat, Schamott, Ton u.a. und Wasser. Diese Werkstoffe werden bei etwa 1.200 °C gebrannt und haben eine niedrige Wasseraufnahme von unter 3% [12]. In Fassaden wird Keramik als Grobkeramik (keramische Spaltplatten, Ziegelplatten u.a.) und als Feinkeramik (unglasierte oder glasierte Steinzeugfliesen) eingesetzt. In der Regel werden keramische Bekleidungen in Fassaden in vorgehängten, hinterlüfteten Konstruktionen ausgeführt, sie können aber auch als einschalige Konstruktionen ausgebildet werden [12].

Man unterscheidet zwischen klein-, mittel- und großformatigen Systemen, wobei die kleinformatischen den Vorteil haben, dass sie an bauliche Geometrien und Strukturen feinstufig angepasst werden können. Nach DIN 18516 dürfen die Platten maximal 0,4 m<sup>2</sup> groß sein und 5 kg wiegen, um ohne eigenen Nachweis eingesetzt werden zu können [2].

### Dreidimensionale Keramikelemente

Mit dreidimensionalen Elementen aus Keramik können unterschiedliche Effekte erzielt werden. Ein gutes Beispiel dafür ist das Museum der Kulturen in Basel (siehe Abbildung 2.28). Das Dach ist mit schwärzlich-grünen sechseckigen Keramikfliesen verkleidet. Die 3D-Kacheln wurden im keramischen Gießverfahren hergestellt und dank der bewährten Eigenschaften von Keramik, wie u.a. Frost- und UV-Beständigkeit, eignen sich diese Elemente perfekt für Außenfassaden. Die Kacheln bewirken, gebündelt auf der Fassade und im Zusammentreffen mit dem Tageslicht, ein ganz besonderes Spiel von Licht und Schatten.



Abbildung 2.27 3D – keramischen Kacheln [18]

Das Hauptgebäude wurde um ein auskragendes, stützenfreies Dachgeschoss ergänzt. Da die bestehenden äußeren und inneren Tragwände die zusätzlichen Lasten nicht zu tragen vermochten, überspannt eine selbsttragende Fachwerkkonstruktion das Gebäude. Es handelt sich um ein stützenfreies Raumfachwerk in Leichtbauweise (siehe die Abbildung 2.29). Zur Erreichung der erforderlichen Bodenfläche für die Halle überkragt die neue Konstruktion das alte Gebäude um bis zu acht Meter. Die Lasten werden über wenige neue Stahlstützen, welche separat fundiert sind, abgeleitet. Mit der ungleichmäßigen Faltung des Daches wird das riesige Dach so gegliedert, dass es sich dem Maßstab der Dachlandschaft der historischen Nachbargebäude anpasst. Dampfsperre und Wärmedämmung sind auf der Außenseite der Stahlkonstruktion angebracht [42]. Durch dieses Projekt wurde die Stärke des Stahlbaus für die Verwirklichung komplexer, leichter Geometrien angezeigt.



Abbildung 2.28 Museum der Kulturen, Basel-Wittenauer [43]



Abbildung 2.29 Raumfachwerk aus Stahl (links) und Anschlussdetails (rechts) [43]

### Herstellung von Fassadenplatten

Es gibt mehrere Verfahren, die sich für die Herstellung von keramischen Fassadenplatten eignen. Beim taktweisen Pressen in Negativformen müssen die Seitenwände der Formen konisch sein. Das Verfahren erlaubt keine Hinterschnidungen. Beim Strangpressen (Extrudieren) bestimmt die Form des Mundstücks den Querschnitt [2].

### Befestigung

Wie bei den meisten Fassadenplatten, werden auch Keramikplatten bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden punktförmig an definierten Stellen mittels Halterungen befestigt. Dabei werden sichtbare und verdeckte Befestigungen unterschieden. Die sichtbare Befestigung wird in der Regel mit Edelstahlklammern oder strenggepressten Klammern aus Aluminiumlegierungen ausgeführt. Mit diesen Klammern wird die Keramikplatte bei Windsogbelastungen abgestützt. Um die Eigenlast aufzunehmen, werden die Keramikplatten mit ihrem unteren Plattenrand auf die horizontalen Klammerschenkel aufgesetzt [12]. Im Gegensatz zur sichtbaren Befestigung, werden bei der verdeckten, rückseitigen Befestigung die Befestigungspunkte in der Plattenfläche positioniert. In der Regel sind vier Punkte in einem Abstand vom Plattenrand angeordnet. Verschiedene Systeme stehen zur Verfügung: die Befestigung mit Hinterschnittankern, mit Verbundkörpern oder die Befestigung durch Kleben [12].

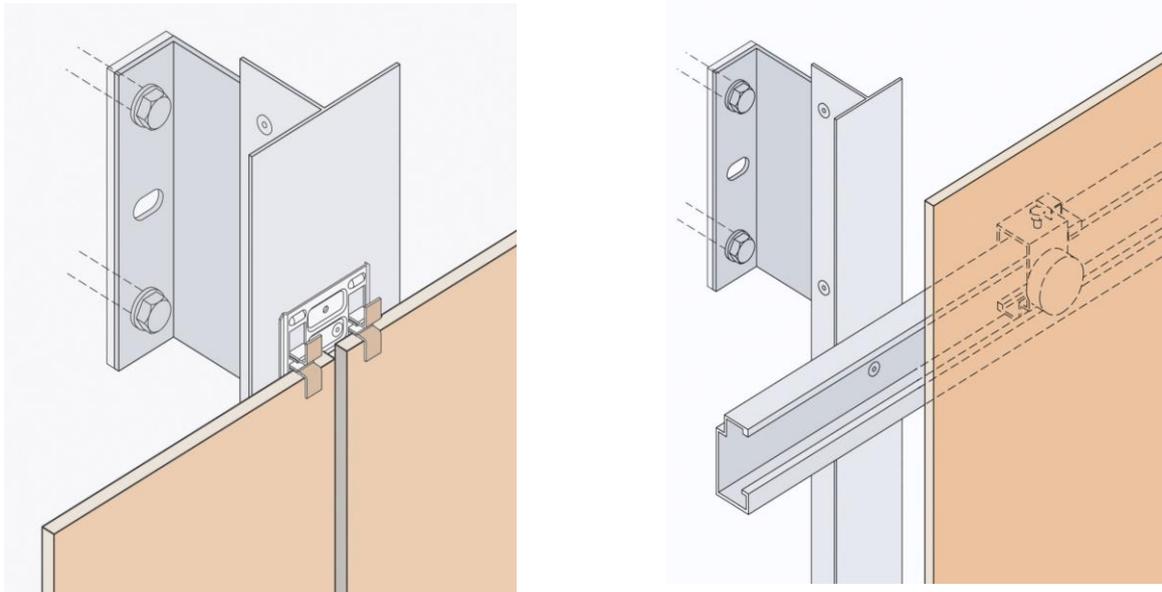


Abbildung 2.30 Sichtbare (links) und verdeckte (rechts) Befestigung der Keramikplatten [12]

## 2.6 Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)

Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) ist ein Faser-Kunststoff-Verbund aus einem Kunststoff (Matrix) und Glasfasern. GFK ist umgangssprachlich auch als Fiberglas bekannt [17].

### Eigenschaften

Durch das Matrixmaterial sind die chemischen, elektrischen und thermischen (Brandsicherheit) Eigenschaften der Materialien beeinflussbar. Als gebräuchliche Materialien für Matrizen sind Polyester, Epoxidharz oder Phenol [19].

GFK weist folgende Vorteile auf:

- Geringes spezifisches Gewicht bei hohen mechanischen Kennwerten
- Alterungs- und Witterungsbeständigkeit
- Korrosionsbeständigkeit
- Hohe chemische Beständigkeit
- Temperaturbeständigkeit
- Geringe Wärmeleitfähigkeit, hohes Wärmedämmvermögen
- Geruchs- und Diffusionsdichtheit.

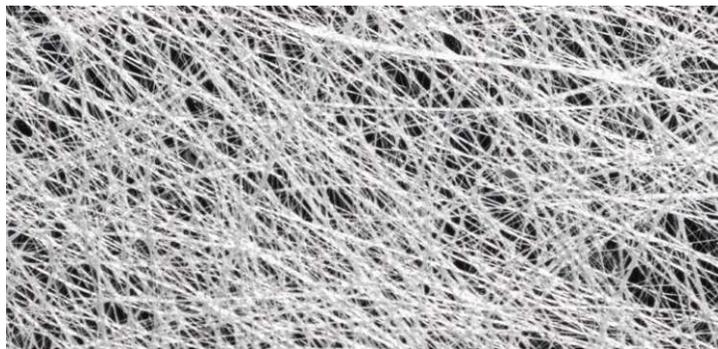


Abbildung 2.31 Glasfaser [Quelle: haasetank.de]

In den nachstehenden Abbildungen wird ein Vergleich der wichtigsten Materialeigenschaften zwischen glasfaserverstärktem Kunststoff und einigen anderen Materialien dargestellt.

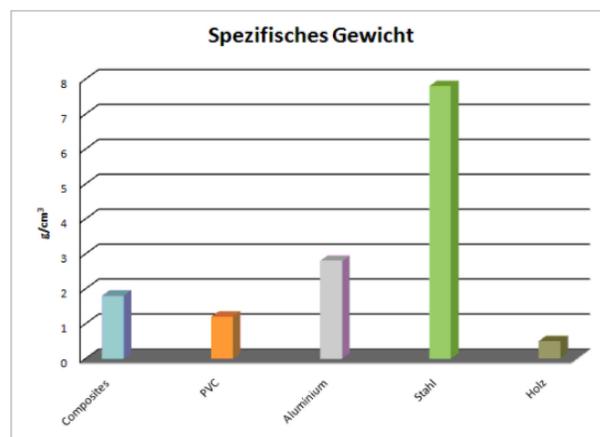


Abbildung 2.32 Vergleich der Materialeigenschaften: spezifisches Gewicht [Quelle: pluessag.ch]

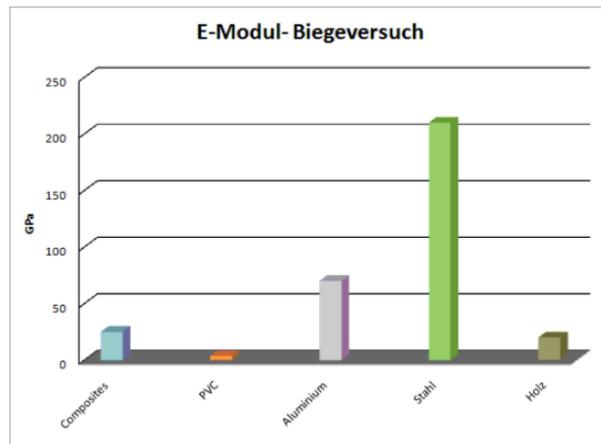


Abbildung 2.33 Vergleich der Materialeigenschaften: E-Modul [Quelle: pluessag.ch]

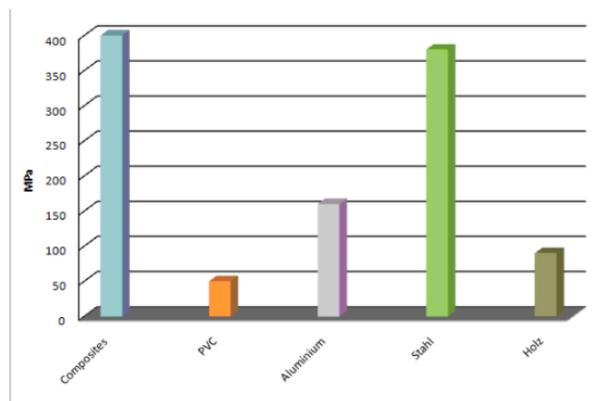


Abbildung 2.34 Vergleich der Materialeigenschaften: Zugfestigkeit [Quelle: pluessag.ch]

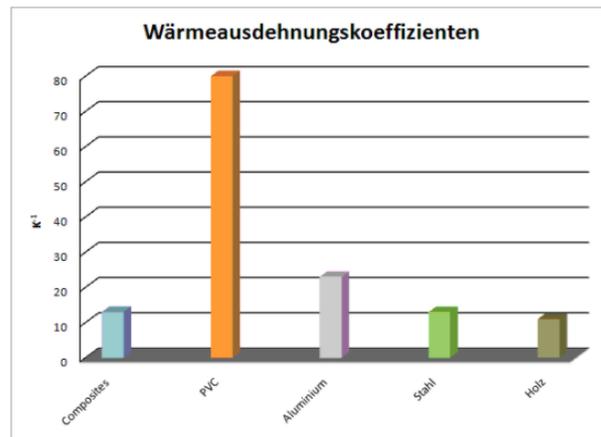


Abbildung 2.35 Vergleich der Materialeigenschaften: Wärmeausdehnungskoeffizient [Quelle: pluessag.ch]

Aus diesen Diagrammen lässt sich feststellen, dass das spezifische Gewicht der Verbundwerkstoffe mit 1,6-2,0 g/cm<sup>3</sup> vergleichbar jener vom PVC ist. Zugfestigkeit liegt bei etwa 400 MPa und ist vergleichbar mit jener von Stahl. E-Modul sowie Wärmeausdehnungskoeffizient sind mit Werten von Holz ähnlich.

### Einsatz in Fassaden

Aus glasfaserverstärktem Kunststoff werden Fassadenpaneele und -platten unterschiedlicher Dimensionen und Formen hergestellt. Diese Platten eignen sich hervorragend für vorgehängte hinterlüftete Fassaden. Verschiedene Farbgebungen sind möglich. GFK-Elemente werden im Pultrusionsverfahren hergestellt und dieser Prozess wird in der nachstehenden Abbildung dargestellt.

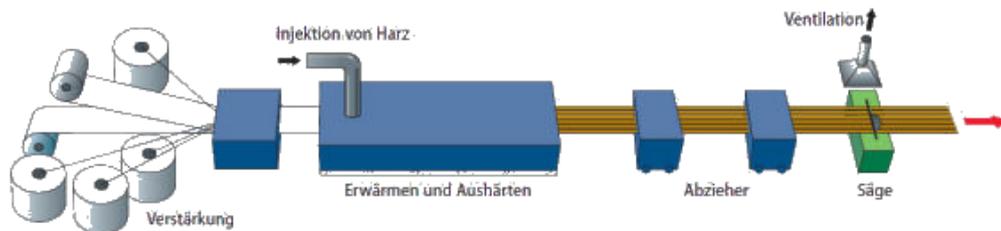


Abbildung 2.36 Pultrusionsverfahren [Quelle: pluessag.ch]

### Lamilux Fassadenplatte

Auf dem Markt gibt es verschiedene Hersteller der GFK-Fassadenplatten. Besonders gute Eigenschaften weisen die „Lamilux“ Fassadenplatten auf.

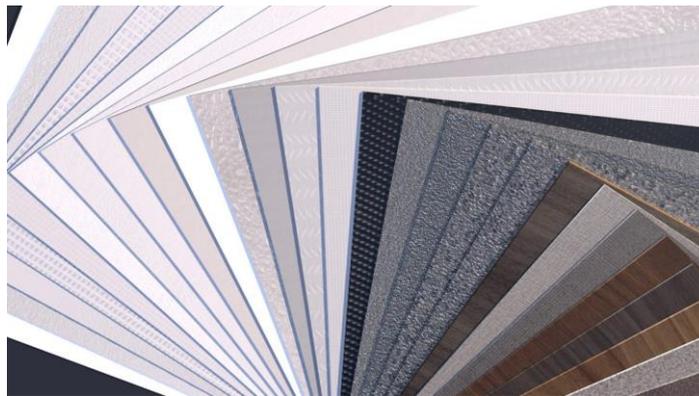


Abbildung 2.37 Lamilux GFK-Fassadenplatte [Quelle: lamilux.de]

Die Platte ist erhältlich [20]:

- in Dicke 5,0mm
- in Standardabmessungen 2,5 x 4 m
- als Plattenware
- in verschiedenen Formen
- optional mit flammhemmendem Harzsystem
- mit Gelcoatoberfläche für maximale UV- und Witterungsbeständigkeit
- 

Spezifische Produktvorteile [20]:

- Hinterleuchtbarkeit
- großformatige Abmessungen möglich
- geringes Flächengewicht
- hervorragende Vandalismusresistenz
- individuelle und flexible Gestaltungsmöglichkeiten
- lange Lebensdauer
- einfache Bearbeitung und einfaches Handling durch geringes Gewicht

Die Fassadenplatten müssen eben sein und die in der nachstehenden Tabelle dargestellten Eigenschaften aufweisen [21].

Tabelle 2.8 Eigenschaften der „lamilux“ Fassadenplatten [21]

<b>Eigenschaften</b>	
Rohdichte (Mittelwert)	1,4 bis 1,5 g/m <sup>3</sup>
Ausdehnungskoeffizient	$\alpha_t = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$
Gesamtgewicht	1950 g/m <sup>2</sup> ( $\pm 10\%$ )
Biegezugfestigkeit	$\geq 111,5 \text{ N/mm}^2$ (bei Prüfung mit der Sichtseite unten) $\geq 79,3 \text{ N/mm}^2$ (bei Prüfung mit der Sichtseite oben)
E-Modul	5531 N/mm <sup>2</sup> (bei Prüfung mit der Sichtseite unten) 5653 N/mm <sup>2</sup> (bei Prüfung mit der Sichtseite oben)
Brandverhalten	Die Platten müssen die Anforderungen der Baustoffklasse B2 Nach DIN 4102-1 <sup>2</sup> erfüllen

### Befestigungen

Befestigungsmöglichkeiten und -materialien sind genau in bauaufsichtlichen Zulassungen definiert (für die Lamilux Fassadenplatte siehe: Zulassung Z-33.2.-1173). Die Platten müssen auf einer geeigneten Unterkonstruktion so montiert werden, dass diese nicht unter Spannung stehen und arbeiten können [22].

Zur Bestimmung der Unterkonstruktion sind folgende Parameter zu berücksichtigen [22]:

- Windlast
- maximale Befestigungsabstände
- normgerechter Einsatz als hinterlüftete Fassade nach DIN 18516-1
- zwängungsfreie Montage
- Plattenabmessungen gemäß der bauaufsichtlichen Zulassung und der Montage-richtlinie
- Dicke einer eventuellen Dämmstoffschicht
- Verankerungsmöglichkeiten in der (Wand-) Konstruktion
- Konkrete Daten sind der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung zu entnehmen

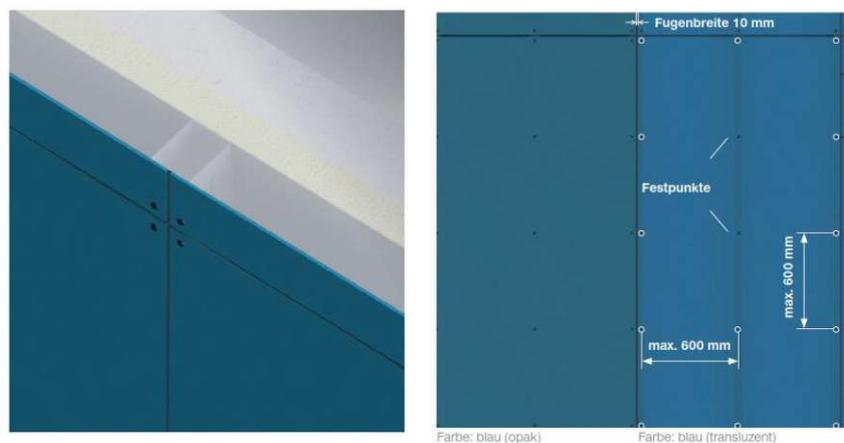


Abbildung 2.38 Befestigung der GFK-Fassadenplatten auf eine Unterkonstruktion aus Aluminium [22]

## 2.7 High Pressure Laminates (HPL)

HPL (engl.: High Pressure Laminates) ist ein Verbundmaterial, das aus zusammengesetztem Phenol-Harz und Holzfasern besteht. Diese Platten sind mit einer Phenolharz-Oberschicht versehen, die kratz- und wetterfest ist. Der Begriff „High Pressure“ bezieht sich auf den hohen Druck und die Temperaturen, unter denen die Holzfasern der HPL Platte zusammengepresst werden [23].

### Eigenschaften

Bei Gebrauch im Freien können die Platten zu mindestens 30 Jahre genutzt werden. Da HPL witterungsbeständig ist, werden die Produkte gerne in der Innen- sowie Außenarchitektur verwendet. Durch HPL Platten kann keine Feuchtigkeit eindringen und sie sind UV-beständig. Dank dichter Oberschichten haftet kaum Schmutz auf den HPL Platten und diese lassen sich daher äußerst einfach reinigen. Alle diese Vorteile machen HPL zum idealen Material für viele verschiedene Anwendungen [23].

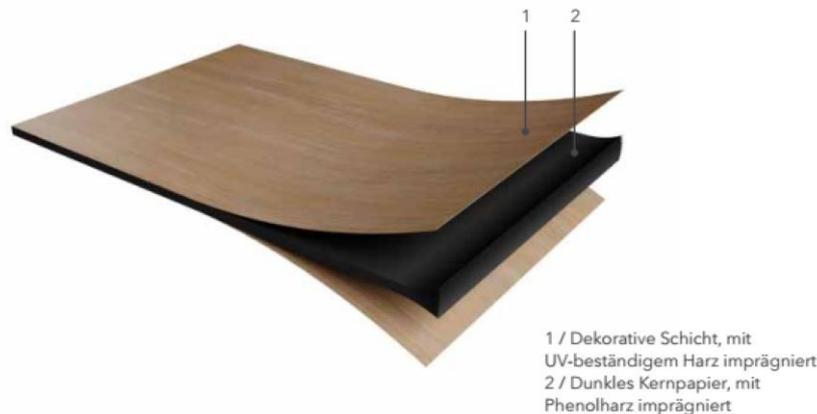


Abbildung 2.39 HPL Platte [24]

HPL Platten finden Anwendungen in folgenden Bereichen [24]:

- hinterlüftete Fassadenbekleidung
- Balkonbekleidung
- Deckenunterschichten
- Fassadenteile
- Fensterladen
- Sonnenschutz
- Lärmschutz

### Herstellung von HPL Platten

Die Herstellung ist von dem Fabrikanten abhängig, wobei jeder seine eigenen Methoden und Produktionsprozesse zur Anfertigung von HPL Platten besitzt. Diese unterschiedlichen Anfertigungen spiegeln sich meistens in den Variationsmöglichkeiten des Erscheinungsbildes (Farben, Design) sowie im Preis wider. Die Eigenschaften der HPL Platten verschiedener Hersteller unterscheiden sich dabei kaum voneinander [23].

### Einsatz in Fassaden

Aufgrund ihrer guten Eigenschaften wie Wetterbeständigkeit und Stärke, werden HPL Platten als Fassadenbekleidung verwendet. Das Material überzeugt durch eine hohe Biegesteifigkeit. Ein weiterer Vorteil ist die digitale Bedruckbarkeit der Fassadenplatten. Es existiert herstellerabhängig eine große Dekorauswahl, sodass die Fassadenverkleidung individuell je nach Bedarf und Wunsch gestaltet werden kann, was diesen Werkstoff sehr flexibel im Einsatz macht.

HPL Platten sind in den Dicken 6, 8, 10 mm standardmäßig verfügbar, wobei die Plattenabmessungen bei ca. 2,0 x 5,5 m liegen und je nach Hersteller variieren. Es sind neben den Standard-Abmessungen individuell zugeschnittene Maße lieferbar [12]. HPL Platten sind insgesamt ein sehr langlebiger und qualitativ hochwertiger Baustoff. Diese sind günstiger als alternative Fassadenverkleidungen aus Holz und Keramik.

Weitere Vorteile der HPL-Platten [26]:

- hohe Resistenz bei Bränden
- Resistenz gegen Vandalismus
- hohe Variabilität bei der optischen Gestaltung der Oberfläche
- Umweltverträglichkeit
- hohe Widerstandsfähigkeit
- Reinigungsfähigkeit
- Langlebigkeit

### Befestigung

Die für die Verarbeitung der HPL-Platten verwendeten Holzbearbeitungswerkzeuge ermöglichen auf der Baustelle einen hohen Grad an Anpassungsfähigkeit. Die Befestigung von Platten an die Unterkonstruktion ist variabel. Die Platten werden meistens direkt auf der Traglattung befestigt. Für eine sichtbare Befestigung werden Schrauben oder Niete und für eine unsichtbare Befestigung Hinterschnittanker oder rückseitig befestigte Konsolen verwendet [12].



Abbildung 2.40 Montage der HPL-Platte [Quelle: ws-onlineshop.de]

## 2.8 Wood Polymer Composites (WPC)

WPC (engl.: Wood Polymer Composites) ist ein naturfaserverstärkter Kunststoff. Das Verbundmaterial besteht aus Holzfasern bzw. -mehl und Kunststoffpolymeren. Der Holzanteil sorgt für Schlag- und Bruchfestigkeit und eine einfache, holzähnliche Bearbeitbarkeit. Andererseits wird das Material durch den Kunststoff als Bindemittel formstabil und maßhaltig, rissfest, witterungsbeständig und erfordert weniger Wartung als Holz [26].



Abbildung 2.41 Inhaltsstoffe von WPC: Holz und Kunststoff [Quelle: casando.de]

### Eigenschaften

Da Holz-Polymer-Werkstoffe biobasierte Materialien sind, leisten diese einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourceneffizienz. Dieser innovative Werkstoff ist daher ressourcenschonend, da er mehrfach stofflich recycelt werden kann. Daher bieten zahlreiche Hersteller nach der Nutzung die kostenlose Rücknahme ihrer WPC-Produkte an, um daraus neue Produkte herzustellen [27].

Weitere Vorteile des Verbundwerkstoffes WPC sind:

- Gut geeignet für den Außenbereich
- Witterungsbeständig
- Rutschfest und splitterfrei
- Einfache Montage

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Ablauf einer Extrusion von WPC-Elementen:

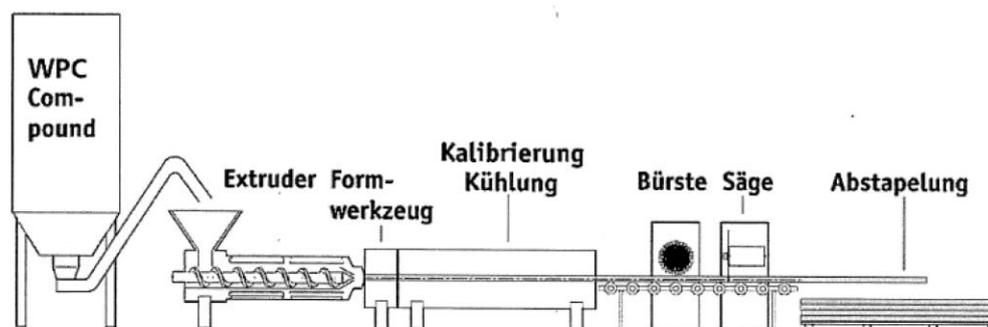


Abbildung 2.42 Herstellung von WPC-Elementen [28]

### Einsatz in Fassaden

Der Verbundwerkstoff WPC wird im Fassadenbereich als Fassadenelement für vorgehängte und hinterlüftete Fassaden eingesetzt. Es handelt sich dabei um die speziell für den Außenbereich geeigneten Holz-Kunststoff-Fassadenelemente. Die Kunststoffmatrix besteht entweder aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polyvinylchlorid (PVC) [28]. Die WPC-Fassadenelemente können nur als nichttragfähiges Bauelement eingesetzt werden (keine bautechnische Zulassung notwendig).

Tabelle 2.9 Grundstoffe der WPC-Fassadenelementen [28]

Inhaltsstoffe	Beschreibung	Anteil in M - %
Holzfasern	Fichte und Kiefer aus Industrierestholz	63
Kunststoffmatrix	Polyethylen (PE) Polypropylen (PP) Polyvinylchlorid (PVC)	29
Additive	Haftvermittler, Gleitmittel, Farbstoffe, Füllstoffe und Dispergierhilfsmittel	8

Neben vielen Vorteilen von den Fassaden aus Holz, gibt es auch einen Nachteil, nämlich dass das Material „arbeitet“, was Wartungen in regelmäßigen Intervallen erfordert. Um diese holztypischen Merkmale zu meiden, wählt man sehr oft die WPC Produkte.

WPC-Fassadenprofile weisen folgende Vorteile auf:

- Hohe Dauerhaftigkeit
- Hohe Maßhaltigkeit
- Pflegeleicht
- Sehr zuverlässige Verbindung mit der Unterkonstruktion
- Blitz- und Schallschutz
- Resistenz gegen Feuchtigkeit und UV-Strahlung
- Form- und Frostbeständigkeit
- Riss- und splitterfrei
- Hoher Widerstand gegen Winddruck
- Geringe Ausdehnung bei Hitze
- Vielfalt bei Optik und Farbe
- Nachhaltigkeit



Abbildung 2.43 Fassadenelemente aus WPC [Quelle: woodentec.de]

In der nachstehenden Tabelle sind die bautechnischen Daten der WPC-Fassadenelementen aufgeführt.

Tabelle 2.10 Bautechnische Daten der WPC-Fassadenplatten [28]

<b>Bezeichnung</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Dichte nach EN ISO 1183-3	1150-1260	kg/m <sup>3</sup>
Flächengewicht	7,5-8,76	kg/m <sup>2</sup>
Feuchtegehalt nach ISO 16979	0-1,5	M.-%
Längenbezogene Masse der Profile nach DIN EN 15534-1:2014	1520-2300	g/m
Abmessungen (Dicke, Länge und Breite der Profile nach DIN EN 15534-1:2014)	2,5/82/1000 20/242/400 0	mm
Abweichung von der Geradheit nach DIN EN 15534-1	1	mm
Krümmung nach DIN EN 15534-1	0,5	mm

### Befestigungen

Es gibt verschiedene, herstellerabhängige Befestigungsmöglichkeiten der WPC-Fassadenelemente. Diese werden meistens auf die Holzunterkonstruktionen befestigt. Zum Beispiel, beim Aufbau der Unterkonstruktion mit einfacher Dämmung, erfolgt vorerst eine waagerechte Unterkonstruktion (Grundlattung). Die Grundlattung wird im bestimmten Abstand montiert (Breite der Dämmung). Die Fassadendämmung wird in den Zwischenraum eingebaut. Danach wird die Traglattung in die Grundlattung fixiert. Zuletzt werden die Fassadenpaneele angebracht [29].

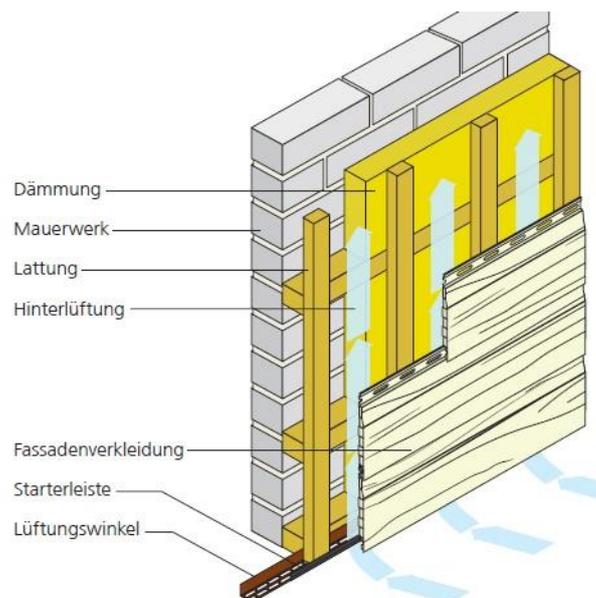


Abbildung 2.44 Unterkonstruktion mit einlagiger Dämmung [29]

## 2.9 Metall

Der Einsatz von Metall lässt einen hohen Vorfertigungsgrad mit großer Präzision zu. Bei den aktuellen Entwicklungen im Bereich der Metallfassaden steht häufig die Möglichkeit im Vordergrund, mit diesen Werkstoffen Bekleidungen sehr freier Gebäudeformen realisieren zu können. Dies wird sowohl durch fortschrittliche, computerunterstützte Planungs- und Umformtechniken, als auch den Einsatz von sehr dünnem Metallblech auf hochkomplexen Unterkonstruktionen möglich [2].

Die besonderen Oberflächeneigenschaften von Metallwerkstoffen tragen zu der oft sehr skulpturalen Wirkung der Bauten bei, wie zum Beispiel beim Guggenheim Museum in Bilbao, bei dem die glatte, schillernde Titanhaut auffällig ist [2].



Abbildung 2.45 Guggenheim Museum in Bilbao (Frank O. Gehry, 1997)  
[2]

Dank der Weiterentwicklung der Metalllegierungen werden heutzutage die Werkstoffeigenschaften für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle immer genauer angepasst. Es existiert eine Reihe von neuen Techniken, die sogar zu dreidimensionalen Werkstoffen führen [2]. Einen sehr großen Einsatz findet Metall bei Verbundwerkstoffen (Composites).

### Eigenschaften

Metallfassaden sind durch ihre Widerstandsfähigkeit und Schutzschicht sehr langlebig und dabei trotzdem wartungsarm. Bei den meisten, im Bereich der Fassade eingesetzten Metallen, handelt es sich nicht um deren Reinform, sondern um Legierungen, da sie im Vergleich zu Reinmetallen über bessere Werkstoffeigenschaften verfügen [2][12].

Alle Metallwerkstoffe sind gas- und damit dampfdicht. Wegen der Wärmeausdehnung müssen die entstandenen Bewegungen konstruktiv oder durch Fügungen aufgenommen werden. Ein Nachteil der Metallwerkstoffe ist, dass die meisten von ihnen unter Umwelteinflüssen reagieren und dabei ihr Erscheinungsbild verändern können [2].

In der nachstehenden Tabelle werden die maßgeblichen Eigenschaften der gebräuchlichsten Werkstoffe für den Einsatz im Fassadenbereich dargestellt.

Tabelle 2.11 Eigenschaften von Metallwerkstoffen (Auswahl), Sortierung aufsteigend nach Ordnungszahlen der Elementarmetalle [2]

Metallwerkstoff	Alum.	Titan	Eisen	Kupfer			Zinn	Gold	Blei					
Chem. Symbol (OZ)	Al(13)	Ti(22)	Fe(26)	Cu(29)			Zn(30)	Sn(50)	Au(79)	Pb(82)				
<b>Legierung</b>				Stahl	rostfrei Edelstahl	wetterf. Stahl	Bau- bronze	Tombak	Titanzinn					
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,7	4,51	7,87	7,8	7,98		8,92	8,73	8,5	7,2	7,2	7,92	19,32	11,34
E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]	65	110	210	210	200	200	132	100	85	90	80	50	75	15
spez. Wärmekapaz. [J/(kg K)]	900	530	460	400			390	380	380	390	398	230	130	130
Wärmeausdehnkoef. [10 <sup>-6</sup> m/(mK)]	23,8	19	12,1	11,7	17,3	11,7	16,8	18,5	19	36	20	20,5	14,2	28,3
Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	160	22	80,4	65	15		305	67	50	116	109	35,3	317	34
Normpotenzial [V]	-1,69		-0,44				+0,35			-0,76		-0,16	+1,38	-0,13
elektr. Leitfähigkeit [m/mm <sup>2</sup> Ohm]	35	1,25	10,3	10,2			60	9	16	16,9	17	8,7	45,7	4,82
<b>Korrosionseigenschaften</b>														
bildet schützende Oxidschicht	ja	ja	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja
zusätzl. Korrosionsschutz erforderlich.	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
farbliche Weiterentwicklung	nein	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja
Abwasser färbend	nein	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein
<b>Halbzeug Blech im Fassadenbereich</b>														
übliche Dicken empfohlener	mm	0,3-1		0,35-3	0,5-3	>3	0,6-0,8				0,7-1,5			2,25-3,0
Mindestbiegeradius innen	t=Blechstärke	2 t		1-2 t	2 t						1,75 t			

### Wetterfeste Baustähle

Wetterfeste Baustähle sind allgemeine höherfeste schweißgeeignete Baustähle mit verbesserter Korrosionsbeständigkeit gegen Witterungseinflüsse (gegen atmosphärische Korrosion). Die entscheidende Rolle spielt dabei eine genau abgestimmte Zusammensetzung [44]. Diese Baustähle werden auch als „Corten-Stähle (Engl.: Corrosion-Resistance-Tensile strength) bezeichnet. Nach der chemischen Zusammensetzung ähneln die marktüblichen wetterfesten Stähle den Baustählen, weshalb diese in EN 10025-5 „Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustahl“ miterfasst sind [11]. Wetterfeste Baustähle enthalten geringe Zusätze von Legierungselementen Chrom, Kupfer, Nickel, Silizium, welche durch Mischkristallbildung die Stahlfestigkeit erhöhen und auch den Ablauf der Korrosion verändern. An der Luft bildet sich auf dem Stahl eine dichte und festhaftende Rostschicht, die vor weiterem Fortschreiten der Korrosion schützt (Prinzip der Passivierung). Aufgrund des Gehaltes an Phosphor, Kupfer und Chrom ist die Färbung anfangs hell rotbraun und später tief dunkelbraun [45]. Wetterfeste Baustähle werden in allen Bereichen des Hochbaus, in der Industrie und vor allem auch im Stahlbrückenbau verwendet. Im Hochbau steht häufig die Verwendung als Fassadenelemente wie der Außenbekleidung von Gebäuden im Vordergrund [11].

### Einsatz in Fassaden

Es gibt verschiedene Ausführungsvarianten für Metallfassaden, welche sie anpassungsfähig für komplexe Gebäude-Geometrien machen. Durch Falzungen, Rundungen, Prägungen und Ausstanzungen werden besondere, individuelle Formen erzielt. Folgende Ausführungsvarianten der Metallfassaden sind erhältlich [12]:

- Kassetten (abgekantetes, großformatiges Fassadenelement)
- Paneele (horizontal, vertikal, diagonal)
- Sandwichelemente
- Gewebe
- Schindeln
- Lochbleche und Streckgitter
- Bänder, Scharen (beidseitig aufgekantete metallbahnen) und Tafel
- Trapez-, Well- und Zickzackprofile
- Metallische Beschichtungen
- Beschläge (Kupfer)

Weiters werden die wichtigsten Vor- und Nachteile der Metallfassaden angeführt.

#### Vorteile der Metallfassaden:

- Witterungsbeständig
- Korrosionsbeständig
- Wartungsarm
- Nachhaltig, da recyclingfähig
- Stabil
- Aluminiumfassaden sind sehr leicht
- Austausch einzelner Fassadenplatten ist problemlos möglich
- Anpassungsfähig an individuelle Fassadengeometrien
- Vielfalt an Verbindungstechniken und Oberflächen
- Sorgt als hinterlüftete Fassade für ein angenehmes Raumklima

#### Nachteile der Metallfassaden:

- Hohe Materialkosten
- Höhere Anschaffungskosten für die Unterkonstruktion
- Größerer Platzbedarf durch hinterlüftete Fassade
- Technische, kühle Optik

## 2.10 Holz

Als Baumaterial hat Holz vielseitige Verwendungsmöglichkeiten. Erste komplexe Holzkonstruktionen von Gebäuden reichen bis in die Jungsteinzeit zurück. Der heutige Stand der Holzfassadentechnik reicht von handwerklicher Fertigung und Montage bis zu technisch und bauphysikalisch sehr weit entwickelten Vollholzwandelementen, die in vollautomatischer Fertigung produziert und als Großtafeln und Raumzellen in sehr kurzen Montagezeiten zu Gebäuden zusammengesetzt werden können [2].

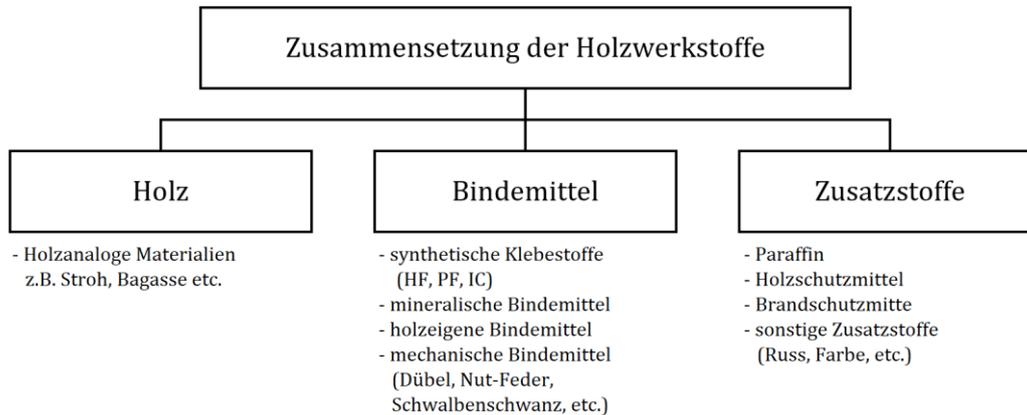


Abbildung 2.46 Zusammensetzung von Holzwerkstoffen [Quelle: waldwissen.net]

### Eigenschaften

Holz ist ein natürliches Produkt, das zu 100% recycelbar ist. Im Vergleich zu allen anderen Baustoffen können Holzprodukte mit dem geringsten Energieaufwand hergestellt werden.

Im Bereich der Fassadenbau sind folgende physikalisch-technische Holzeigenschaften nennenswert [2]:

- Hoher Wärmedurchlasswiderstand
- Hohe Festigkeit bei geringem Gewicht
- Gute Bearbeitungsmöglichkeiten und weit entwickelte Bearbeitungstechnik
- Hygroskopisches Verhalten fördert bei Verbau auf der Fassadeninnenseite den Feuchteausgleich
- Hölzer mit hoher Resistenz (z.B. Lärche) sind ohne Beschichtung für die Außenanwendung geeignet.

Wegen seines porigen Aufbaus weist das mitteleuropäische Bauholz mit seinen mittleren Rohdichten sehr gute Wärmedämmeigenschaften auf. Unter Wärmeeinfluss ist die Längänderung von Holz sehr gering und spielt normalerweise kaum eine Rolle.

Mit seiner Fähigkeit der Feuchteaufnahme und -abgabe kann Holz das Raumklima in Innenräumen günstig beeinflussen. Beim Konstruieren und Bauen hingegen ist diese Holzeigenschaft besonders zu berücksichtigen, da die Wasseraufnahme und -abgabe zum Quellen und Schwinden bzw. zu Dimensionsänderungen führt. Dieses Holzverhalten muss bei allen Bauteilen aus Holz, die dem Außenwandklima ausgesetzt sind, berücksichtigt werden. Das gilt auch für Fassadenverkleidungen aus Holz, die der Wechselwirkung von Sonne und Regen ausgesetzt sind.

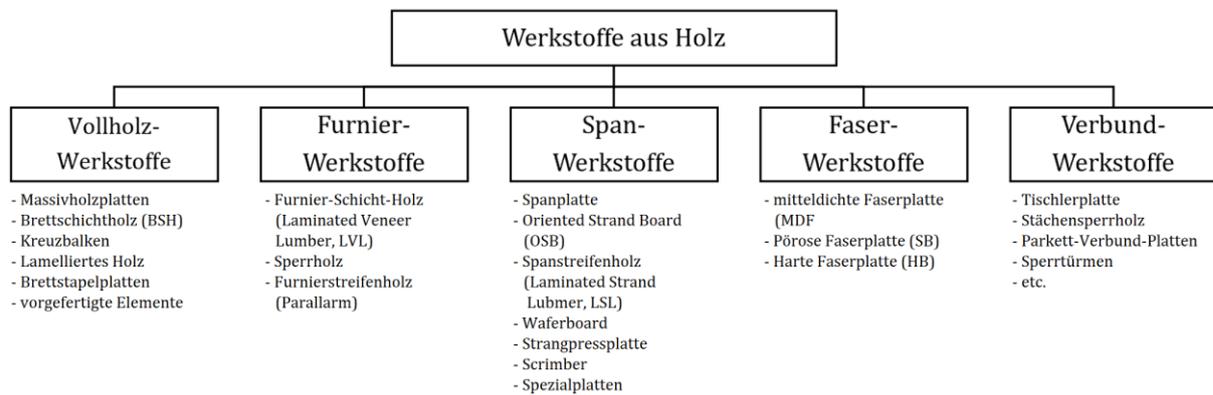


Abbildung 2.47 Einteilung von Holzwerkstoffen [Quelle: waldwissen.net]

### Mechanische Eigenschaften

In der folgenden Tabelle werden die wichtigsten mechanischen Eigenschaften verschiedener Holzwerkstoffe angezeigt. Je nach Aufbau variieren die Eigenschaften von Holzwerkstoffen sehr stark.

Tabelle 2.12 Ausgewählte Kenngrößen verschiedener Holzwerkstoffe [Quelle: waldwissen.net]

Eigenschaft		Spannplatte	MDF	OSB (Europa)	LVL	LSL	Massivholz- platte	PSL
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	680-700	760-790	660-700	660-700	650	450	660
E-Modul	[N/mm <sup>2</sup> ]	2000-3000	4000-4500	7000	13000-16000	12000	5000-7000	1400-15000
	<i>parallel</i>			7000			5000-7000	
	<i>senkrecht</i>			1850			1000-3000	
Biegefestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	20-22	33-38					
	<i>parallel</i>			36			30-50	
	<i>senkrecht</i>			20-25			Okt 30	
Schubmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]							
	<i>flach</i>	100-180	100-200	300	500		200	
	<i>hochkant</i>	1000-1500	600-1000	1100	500	2300	600-700	780-800

### Einsatz bei Fassaden

Im Bereich der Fassaden wird der Werkstoff „Holz“ auf verschiedenste Weisen verwendet. Da Holz sehr gute konstruktive und bauphysikalische Eigenschaften aufweist, kann es als tragendes Fassadenprofil in Pfosten-Riegel-Konstruktionen, in Fensterkonstruktionen oder als hinterlüftetes Bekleidungselement in Brett-, Platten- oder Schindelform verwendet werden [12].

Folgende Verkleidungsarten aus Holz sind möglich:

- Sägeraue und gehobelte Lamellenverkleidungen
- Plattenverkleidungen
- Schindeln
- Thermoholz

Die häufigsten Verkleidungen aus Holz sind in Form von Platten. Diese Platten ermöglichen eine einfache und arbeitszeitsparende flächige Fassadengestaltung. Auf Grund der guten technischen Eigenschaften und der Formstabilität werden hauptsächlich mehrschichtig verleimte Massivholzplatten oder Sperrholzplatten eingesetzt. Mit Großformaten bis zu 5m Seitenlänge wird eine stoßfreie Ausführung auch über mehrere Geschosse möglich [30].

## 2.11 Glas

Glas gehört zu den ältesten Werkstoffen der Menschheit. Zur industriellen Herstellung von Flachglas wird heute das Floatverfahren angewendet. Dieses kostengünstige Verfahren ermöglicht die Herstellung von Glas in unterschiedlichen Variationen.

Der heute bekannte Glasstein entstand um 1930, als erstmals zwei schalenförmige Glassteine unter Hitze und Druck dauerhaft zusammengefügt wurden. Diese Technik wird bis heute angewendet [2].

### Eigenschaften

Unter Glas wird ein Schmelzprodukt aus Quarzsand, Natron und Kalk sowie anderen Zuschlagstoffen verstanden. Mit zusätzlichen Stoffen können sowohl die Färbung als auch die besonderen Eigenschaften von Glas beeinflusst werden. Diese Stoffe werden bei der Herstellung bei Temperaturen über 1000 °C eingeschmolzen. Aufgrund seines molekularen Aufbaus ist Glas ein amorpher, isotroper Werkstoff, in seinen physikalischen Eigenschaften also richtungsunabhängig [2].

In der nachstehenden Tabelle ist die europaweite in der EN 572-1 festgelegte Zusammensetzung vom Glas dargestellt.

Tabelle 2.13 Zusammensetzung vom Glas lt. EN 572-1 [2]

Stoff	chem. Bezeichnung	Anteil in %
Siliciumdioxid	(SiO <sub>2</sub> )	69-74 %
Calciumoxid	(CaO)	5-12 %
Natriumoxid	(Na <sub>2</sub> O)	12-16 %
Magnesiumoxid	(MgO)	0-6 %
Aluminiumoxid	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0-3 %

Im Gegensatz zu elastisch verformbaren Materialien wie Metall zerbricht Glas bereits bei einer geringfügigen Überschreitung der Grenze seiner elastischen Verformbarkeit [2]. Die Druckfestigkeit von Glas beträgt 1000 N/mm<sup>2</sup> und ist mit der von Stahl vergleichbar. Jedoch liegt die Biegebruchfestigkeit bei herkömmlichen Floatglas nur bei ca. 30 bis maximal 60 N/mm<sup>2</sup>.

Die thermische Ausdehnung von Alkali-Kalk-Silikatgläsern ist in etwa vergleichbar mit der von Stahl aber deutlich kleiner als der thermische Ausdehnungskoeffizient von Aluminium. Letzteres ist besonders bei Fassadenkonstruktionen zu beachten.

Auf Grund seiner silikatischen Zusammensetzung besitzt Glas eine hohe chemische Resistenz gegenüber aggressiven Substanzen, ausgenommen sind heiße alkalische Lösungen, Flusssäure und Wasser [2].

Glas weist gute Brandschutzeigenschaften auf und gilt als ein nicht brennbarer Baustoff. Glas beginnt bei etwa 700 °C weich zu werden und hält aufgrund seiner geringen Temperaturwechselbeständigkeit kaum Differenzen von mehr als 60 K stand [2]. Aus diesem Grund wird die im Falle eines Brandes auftretende Hitzestrahlung fast vollständig durchgelassen.

Glas besitzt wegen seiner geringeren Masse schlechte Schallschutzeigenschaften und ist ein guter Schallleiter. Durch die Verwendung von Mehrscheibengläsern und Scheibenzwischenräumen wird die Schallübertragung gemindert.

In der nachstehenden Tabelle werden allgemeine physikalische Eigenschaften von Glas dargestellt.

Tabelle 2.14 Allgemeine physikalische Eigenschaften von Glas [2]

Eigenschaften	Symbol	Zahlenwert	Einheit
Dichte bei 18 °C	r	2500	kg/m <sup>3</sup>
Härte		6 Einheiten	nach Mohs-Skala
Elastizitätsmodul	E	7 x 10 <sup>10</sup>	Pa
Poissonsche Zahl	m	0,2	-
spezifische Wärmekapazität	c	0,72 x 10 <sup>3</sup>	J/(kg x K)
mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient	a	9 x 10 <sup>-6</sup>	K <sup>-1</sup>
Wärmeleitfähigkeit	l	1	W/mK
mittlerer Brechungsindex im sichtbaren Wellenlängenbereich	n	1,5	-

### Einsatz in Fassaden

Im Fassadenbereich wird Glas auf verschiedenen Arten und Weisen eingesetzt. In der modernen Architektur ist Glas eines der beliebtesten Fassadenmaterialien. Mit Glas werden außergewöhnliche Ideen für moderne Gebäudehüllen verwirklicht. In der dekonstruktivistischen Architektur ist Glas ein häufiges Material. Doch Glasfassaden sind nicht nur faszinierende Bestandteile des urbanen Lebens, sondern sie müssen auch viele funktionalen Aufgaben erfüllen.



Abbildung 2.48 Chadston Shopping Centre in Melbourne: Stahl-Glas Überdachung [Quelle: seele.com]

## Glasarten für den Fassadenbau

### *Floatglas*

Floatglas (Spiegelglas) ist ein hochwertiges, klares Flachglas mit ebenen und planparallelen Oberflächen [2]. Im Fassadenbau ist Floatglas heute das am meisten verwendete Glas, mit welchem Ein- und Mehrfachverglasungen realisiert werden. Im Floatglasverfahren werden Glasdicken von 2 bis 25mm hergestellt.

### *Gussglas*

Gussglas (Ornamentglas) ist gegossenes und gewalztes Flachglas, das unter Anwendung eines kontinuierlichen Walzverfahrens entsteht und nicht klar durchsichtig (transluzent) ist. Unter Anwendung der profilierten Walzen, werden die Glasscheiben mit strukturierten Oberflächen erhalten und ergeben so unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten. Derartige Gläser kommen beispielsweise als Sichtschutzverglasung zum Einsatz [2]. Hergestellt wird Gussglas in Dicken zwischen 3 und 10 und seine physikalischen Eigenschaften entsprechen denen von Floatglas.

### *Profilbauglas*

Profilbauglas (auch Profilglas genannt) stellt eine spezielle Art des Gussglases dar, das durch einen zweiten Walzvorgang in Form von U-Profilen hergestellt wird. Dank dieser Querschnittsform wird eine hohe Belastbarkeit des Glases gewährleistet, welche die Konstruktion von sprossenlosen Fassadenflächen ermöglicht. Herstellerabhängig ist Profilglas in Breiten zwischen 22 und 50 cm und mit einer maximalen Länge bis 7,00 m erhältlich.

### *Glassteine*

Unter Glassteine (auch Hohlglassteine genannt) versteht man Hohlglaskörper, die aus zwei aneinander geschmolzenen Glasschalen bestehen [12]. Mit Abkühlung der Luft entsteht ein Unterdruck im versiegelten Hohlraum, wodurch die Wärmedämmeigenschaften verbessert werden. Im Vergleich zu den modernen Isoliergläsern ist der Wärmedämmwert aufgrund der vielen Wärmebrücken deutlich schlechter [2]. Hohlglassteine können glatt oder strukturiert ausgebildet werden und dürfen ausschließlich als nicht tragende Elemente verwendet werden.

### *Drahtglas*

Bei der Herstellung des Drahtglases in einem Walzverfahren, werden während des Walzprozesses Drahteinlagen eingebracht. Dadurch werden die Eigenschaften bezüglich Einbruchsicherheit und Brandschutz verbessert. Bei diesen Gläsern ist besonders auf Korrosionsgefahr zu achten. Bei schlechtem Korrosionsschutz kann es zu Volumenänderungen der Stahldrähte kommen, was zu Verfärbungen oder Glasbruch führt.

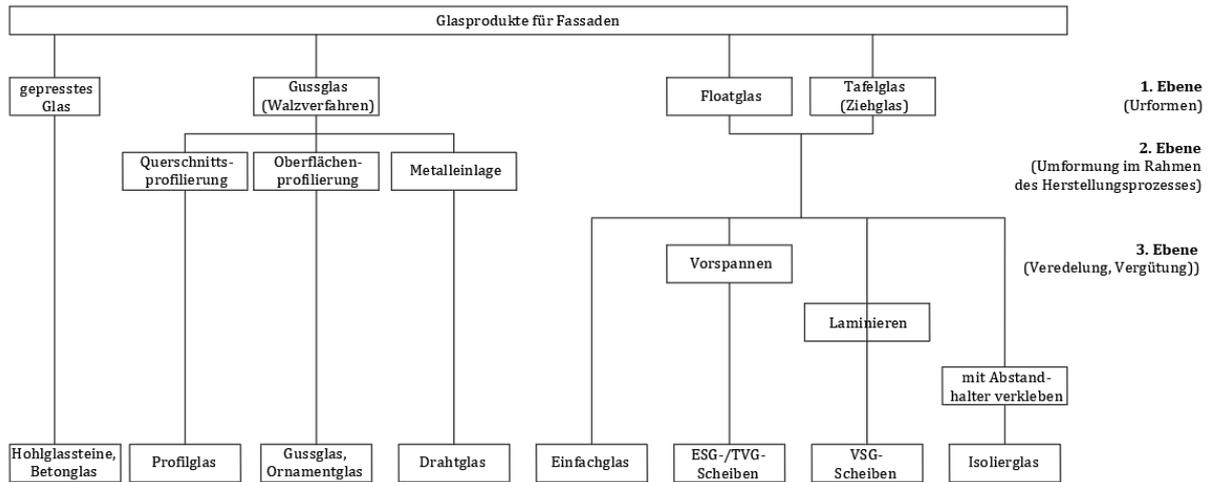


Abbildung 2.49 Glasprodukte für Fassaden [2]

### Modifizierte Gläser für Fassaden

Durch die Beeinflussung der materialspezifischen Eigenschaften von Glas, wird die Anpassung der bestimmten Gläser an den jeweiligen Verwendungszweck möglich. Einige Einflussmöglichkeiten sind: Veränderung der Glasrezeptur, die thermische oder chemische Behandlung des Glases, die Veränderung der Glasoberfläche und die Herstellung von Verbund- und Isolierverglasungen.

Im Fassadenbau wird Flachglas am meisten verwendet. Der größte Anteil der heute errichteten Glasfassaden besteht aus Flachglas, das als Isolierglas, ESG- oder VSG-Verglasung in den unterschiedlichsten Variationen und Kombinationen zum Einsatz kommt [2].

#### Isolierglas

Isoliergläser bestehen aus zwei oder mehreren Floatglasscheiben, mit einem Scheibenzwischenraum von 8 bis 24 mm, der über einen Randverbund luftdicht zur Umgebung abgeschlossen ist. Durch spezielle Füllungen bzw. zusätzliche Folien im Scheibenzwischenraum oder durch Beschichtungen der inneren Scheibenoberfläche können die Wärmedämmeigenschaften einer Isolierverglasung verbessert. So wird beispielsweise eine Füllung des Zwischenraums mit einem Edelgas zur Verbesserung Wärmedämmung führen [2][12].

#### Verbundsicherheitsglas (VSG)

Unter VSG versteht man zwei oder mehrere Glasscheiben, die durch eine zähelastische Kunststoffolie (Polyvinylbutyral) oder mithilfe von Gießharz zusammengeklebt sind. Es gibt zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten, um die Verglasungseigenschaften an spezifische Erfordernisse anzupassen. Bei Verbundsicherheitsglas bleiben bei Bruch der Scheibe die Glassplitter an der Zwischenschicht hängen, so wird die Verletzungsgefahr deutlich verringert. VSG kann plan oder gebogen aus Floatglas, Einscheibensicherheitsglas (ESG) oder teilvorgespanntem (TVG) hergestellt werden.

### *Einscheibensicherheitsglas (ESG)*

Durch thermische Behandlungen von Glas werden vor allem die Biegebruchfestigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit verbessert. Zur Herstellung von ESG wird die Glasscheibe auf über 640 °C erhitzt und anschließend sofort mit kalter Luft angeblasen [2]. An der Oberfläche zieht sich das Glas zusammen und erstarrt, während die Scheibe im Glaskern noch heiß und weich ist. An der Glasoberfläche wird dadurch eine Druckspannung aufgebaut, die zur Erhöhung der Biegebruchfestigkeit (ca. 90-120 N/mm<sup>2</sup>) und Temperaturwechselbeständigkeit führt (Floatglas 40 K, ESG 200 K) [2]. Bei einer Überbelastung des ESG zerbricht in kleine Glaskrümel, wodurch eine Verletzungsgefahr vermieden wird.

### *Teilvorgespanntes Glas (TVG)*

Bei der Herstellung von TVG wird die Glasscheibe ebenfalls einer speziellen Temperaturbehandlung (über 640 °C) unterzogen. Jedoch erfolgt hier der Abkühlvorgang nicht so intensiv wie bei ESG, wodurch die Festigkeit im Bereich der Glasoberfläche geringer ist. Daher sind die Werte der Biegedruckfestigkeit (ca. 40-75 N/mm<sup>2</sup>) und der Temperaturwechselbeständigkeit (Floatglas 40 K, TVG 100 K, ESG 200 K) niedriger im Vergleich zu jener der ESG-Verglasung [2]. Aus diesem Grund ergibt sich im Versagensfall ein anderes Bruchbild mit größeren Glaskrümeln.

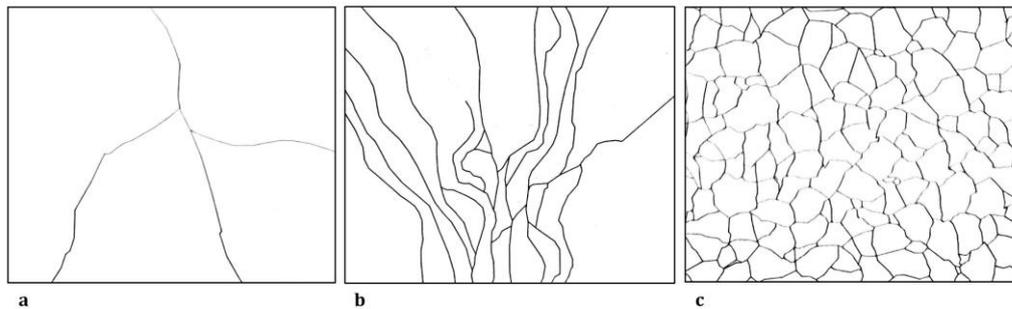


Abbildung 2.50 Bruchbild des Glases: a) Normalglas; b) TVG; c) ESG [2]

## 2.12 Das Fassadenmaterial „Made of Air“ (MOA)

Der neue Fassadenwerkstoff „Made of Air“ (MOA) wurde 2018. in Berlin von der Architektin Allison Dring und dem Materialforscher Daniel Schwag entwickelt. Die Idee war, einen Fassadenwerkstoff zu entwickeln, mit dessen Hilfe städtische Luft aktiv gereinigt werden kann. Ihr Resultat nach einer zweijährigen Forschungstätigkeit ist ein innovatives Material, das mehrfach nachhaltig sein soll: „Made of Air“ (MOA) ist ein auf Biokohle basierendes Material, das zu 90 Prozent aus Kohlenstoff besteht, der aus der Luft zurückgewonnen wurde [12].

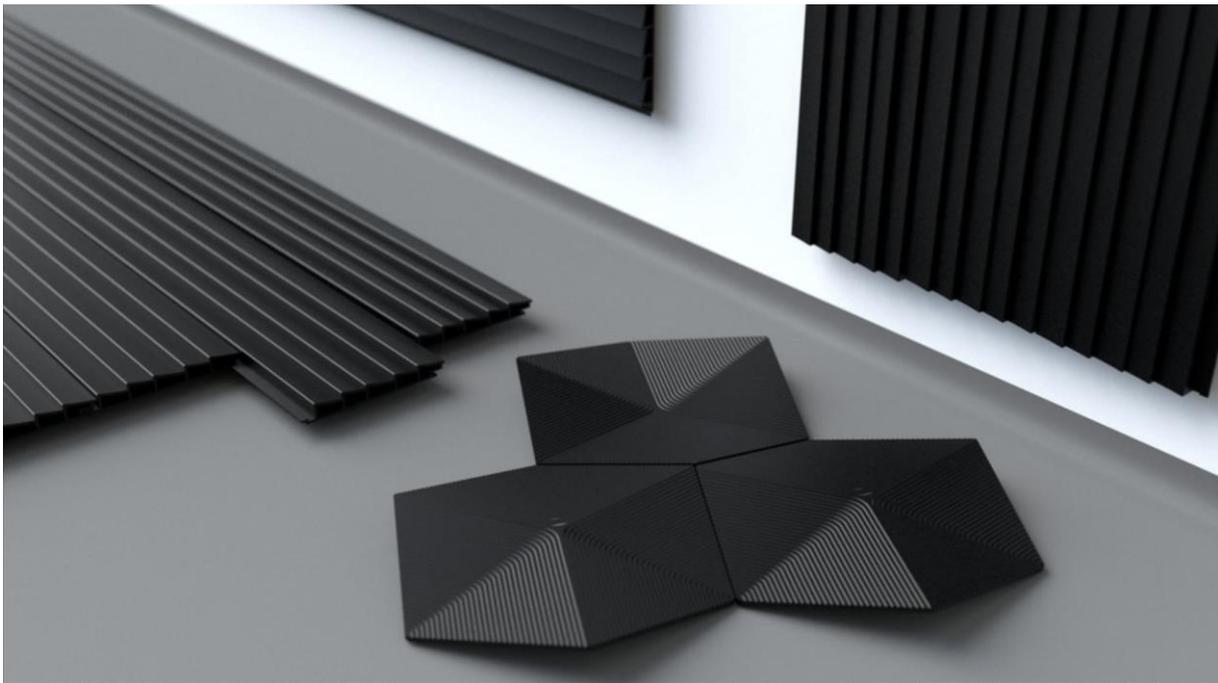


Abbildung 2.51 Das Fassadenwerkstoff „Made of Air“ (MOA), Berlin [Quelle: madeofair.com]

### Wie entsteht MOA?

In lebendigen Wäldern gibt es viele Reste von Holz und Pflanzen. Genau diese Abfälle sind einer der Rohstoffe, aus dem MOA entsteht. Diese Biomasse wird bei der Pyrolyse in speziellen Öfen ohne Luftzufuhr verbrannt, anschließend wird das in ihr enthaltene Wasser abgespaltet. Übrig bleibt Pflanzenkohle (Biokohle), die den in den Pflanzen enthaltenen Kohlenstoff speichert. Dank diesem Prozess besteht MOA buchstäblich aus Kohlenstoff, der aus der Luft gewonnen wird. Aus der so entstandenen Biokohle wird ein neues Material hergestellt, welches für eine Vielzahl von Anwendungen verwendbar ist, wie beispielsweise für Möbel oder Fassade.

Wichtig zu erwähnen wäre die, bei der Verbrennung von Biomasse, entstandene Hitze, die gespeichert oder zu elektrischer Energie konvertiert. So wird MOA auch Energie positiv.

# 3 Komplexe Fassadensysteme

## 3.1 Membransysteme – Textilfassaden

Mit Textilfassaden sind sehr anpassungsfähige Fassadenkonzepte realisierbar, mit denen sich vielfältiges Gebäudestrukturen attraktiver gestalten lassen. Dank der ausgereiften Systemtechnik bietet die Textilfassade eine funktionale und außergewöhnliche Gestaltungsfreiheit mit praktischen Vorteilen. Das Ergebnis überzeugt als intelligente Lösung für stetig wachsende Anforderungen an die Gebäudearchitektur [32].

Textilfassaden eignen sich sowohl für den Neubau als auch für die nachträgliche Sanierung von Bestandsgebäuden. Sie verfügen über ein breites Anwendungsspektrum. So wurden bereits weltweit Projekte vom Einfamilienhaus über Büro- und Gewerbebauten, Krankenhäuser, Veranstaltungsstätten, Parkhäuser bis hin zu Sonderkonstruktionen realisiert, wie jüngst das Beispiel vom 246 m hohen Test-Turm für Aufzugssysteme in Rottweil belegt [33].



Abbildung 3.1 Flexible Textilfassade [32]

### Eigenschaften von Textilfassadensystemen

Textilfassaden bestehen aus einer Spann- und Befestigungstechnik und einem speziell dafür entwickelten Gewebe. Je nach Material und Ausführung erfüllt die Fassade verschiedene Funktionen wie Sichtschutz, Lärmschutz, Sonnenschutz, Schutz vor Sandstürmen etc. [34]. Es werden dafür spezielle Beschichtungen entwickelt, die für eine lange Lebensdauer sorgen und auch selbstreinigende Eigenschaften des Gewebes gewährleisten.

Textilfassaden sind natürliche Klimaanlage ohne Energieeinsatz. Solche Fassadensysteme gelten daher als bioklimatische Fassaden, da sie den Einfluss auf die sogenannte graue Energie eines Gebäudes nehmen. Privatsphäre wird geschützt, da die Sicht von außen nach innen blockiert wird. Aufgrund des geringen Gewichts ist es auch einfach, die Fassade auf bereits vorhandene Gebäude anzuwenden.

### Fallstudie

Eine Fallstudie an einem konkreten Gebäude in Deutschland hat gezeigt, wie man die ungewünschten Konsequenzen mit Einsatz von Textilfassaden vermeiden konnte [34]. Es ging darum, dass die Bauherren die Kosten bei einer Ganzglasfassade niedrig halten wollten. Aus diesem Grund wurde keine Gebäudeklimatisierung geplant. In den Monaten April bis Oktober stiegen die Innentemperaturen auf ein unangenehmes Niveau, was zu unerwünschten Konsequenzen führte. Erst als das Gebäude fertig war, schlug der Architekt eine Verdunstungskühlung oder eine Fassadenbegrünung vor. Diese Lösungen haben die folgenden Nachteile:

- Gesundheitliche Bedenken bei schlechtem Unterhalt der Verdunstungskühlung. Dies führt zu permanenten Wartungsarbeiten. Hohe Anschaffungs- und Betriebskosten
- Fassadenbegrünung ist wegen klimatischer Bedingungen oder Bauhöhen nicht immer möglich. Die Hitze lässt die Pflanzen verdorren. Je höher das Gebäude, desto wahrscheinlicher, dass die Pflanzen überhaupt die Höhe erreichen.

In diesem Fall wäre die Textilfassade sicherlich eine bessere Lösung. Sie bringt folgende bemerkenswerte Vorteile:

- Gute Sicht von innen nach außen
- Sichtschutz von außen nach innen
- Reduzierter Schall und die Rückkopplung
- Gute CO<sub>2</sub> Bilanz
- Wartungsfrei
- Höhere Effizienz als Sonnenblenden
- Nachträgliche Anwendung an bestehendem Gebäude
- Funktionsfähig unter jedem Klima
- Schutz der Glasfassade vor Schäden durch Sandstürme
- Umweltfreundlich
- Keine gesundheitlichen Risiken

Im Folgenden wird detaillierter auf das Gewebematerial sowie die Spann- und Befestigungstechniken eingegangen.

### Gewebe, Spann- und Befestigungstechniken

In der Praxis werden heute überwiegend Gewebe aus Polyester (PES) mit Polyvinylchlorid (PVC)-Beschichtung sowie Gewebe aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit Polytetrafluorethylen (PTFE)-Beschichtung eingesetzt. Auf dem Markt sind zahlreiche Farbvarianten und unterschiedliche Transparenzgrade von Geweben verfügbar. Polyesterewebe können auch individuell beliebig bedruckt werden. Das Flächengewicht von Standardgeweben (PES/PVC) liegt bei etwa 500g/m<sup>2</sup>. Das Flächengewicht kann aber auch in Abhängigkeit der Gewebeart und des Öffnungsgrades bis zu 1.050 g/m<sup>2</sup> ansteigen [33].

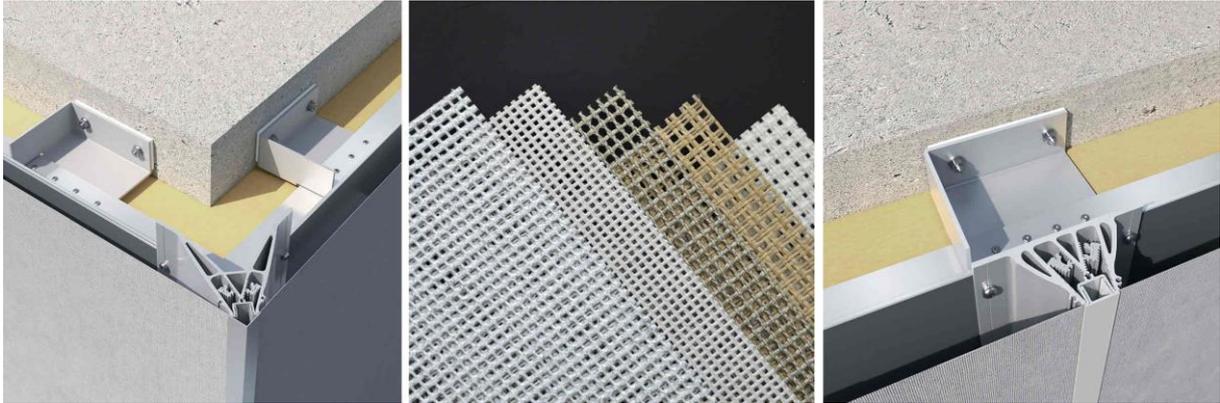


Abbildung 3.2 Gewebe, Spann- und Befestigungstechniken [Quelle: schueco.com]

Durch die Webmaschine im Produktionsprozess wird die Breite der textilen Fassadenge-webe bestimmt. Standardmäßig sind diese über eine Breite von 270 bis 420 cm verfügbar. Zur Herstellung von großflächigen Fassadenmembranen werden die einzelnen Gewebe im Thermoschweißverfahren zusammengefügt. Dabei werden die Einzelgewebe im Randbereich jeweils ca. 4cm übereinandergelegt und thermisch miteinander verbunden. So entstandenen Schweißnähte sind anschließend sichtbar und können das Erscheinungsbild prägen. Auf der Baustelle werden die maßgefertigten Textilien ausgerollt und abschließend in die vorgesehen Spannrahmprofile eingespannt [33].

### Luftfilternde textile Fassade

Um der anhaltenden Luftverschmutzung entgegen zu wirken, wurde ein Fassadensystem entwickelt, das speziell die Eigenschaften von vertikalen Gebäudehüllen nutzt, um Schadstoffe aus der Außenluft zu filtern. Dafür wird die vorgesetzte Gebäudehülle als großflächiger urbaner Luftfilter aktiviert, ist dabei jedoch nicht auf die Zufuhr von elektrischer Energie angewiesen [33]. Die Idee für eine solche luftreinigende Fassade ist vom Jan Serode gekommen. Er hat in seiner Masterarbeit einen theoretischen Plan für ein luftreinigendes Gebäude entwickelt. Im Rahmen einer RWTH-Forschungsarbeit wurde eine erste Prototypenfassade entwickelt, die abschließend am Campus des Immobilienunternehmens ECE in Hamburg realisiert wurde.



Abbildung 3.3 Luftfilternde textile Fassade [33]

Die textile Fassade besteht aus modifiziertem Polyestergewebe, welches mit einer fotokatalytischen Beschichtung versehen wird. Das bewirkt, dass die gesundheitsschädlichen Stickstoffoxide aus der Stadtluft unter UV-Licht direkt an die Fassadenoberfläche gebunden werden. Diese Schadstoffe werden durch Oxidationsprozesse in unschädliche Salze umgewandelt. Bei Regen wird die Fassadenoberfläche von diesen Salzurückständen befreit, die nur in geringen Mengen anfallen und in den natürlichen Kreislauf der Natur zurückgeführt werden.

Bei bisherigen Untersuchungen wurde bereits eine deutliche Reduktionsrate des klimaa- und gesundheitsschädlichen Gases Stickstoffdioxid nachgewiesen. Auffallend in den Messungen ist, dass die Fassade besonders im Kontaminationsbereich oberhalb von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hohe Reduktionsrate erzielt [33].

### Précontraint®-Technologie

Die textile Fassade besteht aus Textilgewebe, das mittels „Précontraint®-Technologie“ produziert wird. Bei dieser patentierten Technologie wird die Verbundmembran während des gesamten Fertigungsprozesses in beide Richtungen unter Spannung gesetzt. Dieses Verfahren verleiht dem Textil eine sehr hohe Rissfestigkeit, Dimensionsstabilität und Robustheit. Daher sind beliebige Gestaltungen des Fassadenrasters möglich.

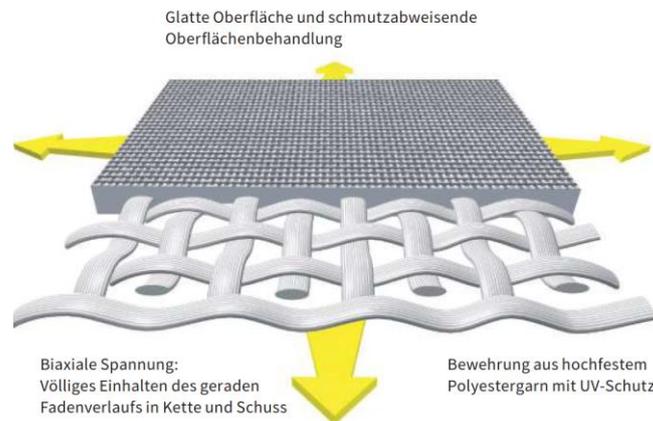


Abbildung 3.4 Précontraint®-Technologie [35]

Eine solche Fassade besitzt besondere Eigenschaften wie:

- Freie Formgestaltung
- Robustheit und lange Lebensdauer
- Wärme- und Sonnenschutz
- Ausgezeichnete Sicht nach draußen
- Schutz gegen Wind
- Leicht, beständig, 100% recyclefähig

Folgende Vorteile sind ebenfalls nennenswert:

- Gute Flächenstabilität
- Keine Verformung, weder bei der Montage noch bei Gebrauch
- Eine Nachspannung ist nicht erforderlich
- Nachhaltige mechanische Festigkeit (behält seine ursprüngliche Form)
- Lange Lebensdauer
- Gleichmäßige Oberfläche, pflegeleicht

### Spann- und Befestigungstechniken

Das Gewebe wird durch ständige Witterungseinflüsse, unruhige Windlasten, sowie hohe Temperaturunterschiede belastet. Daher muss es in jeder Situation so befestigt sein, dass es zu keinem Schlagen des Gewebes kommt. Im Falle einer falschen Befestigung können Hebelwirkungen der Kräfte entstehen, die nicht mehr zu beherrschen sind. Um diese ungewünschten Effekte zu vermeiden, muss das Gewebe gleichmäßig über die gesamte Fläche bis in die Ecken gespannt sein. So wird ebenfalls eine gleichmäßige Kraftverteilung an der Gewebekante gewährleistet.

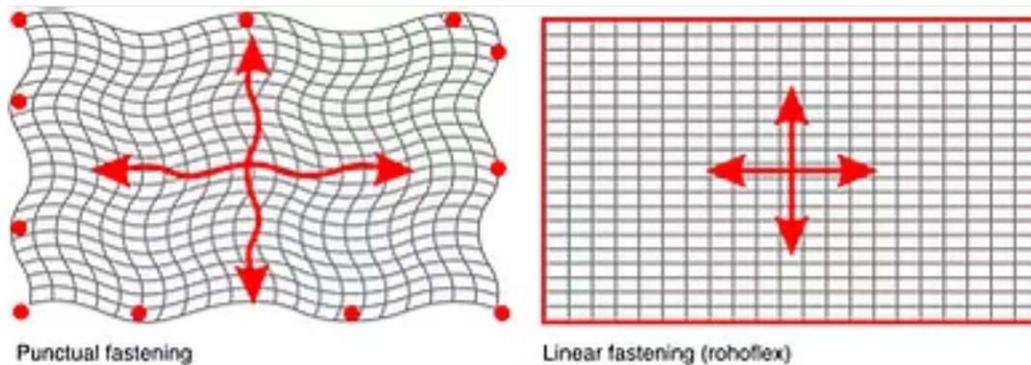


Abbildung 3.5 Punktuelle und lineare Befestigung des Gewebes [34]

Als Verbindung der Spanntechnik zum tragenden Gebäudekomplex dienen verschiedene Halter oder Stahlunterkonstruktionen. Die genauen Bemessungen sind vom Statiker durchzuführen.

Auf dem Markt sind unterschiedliche Spanntechniken erhältlich. Eine seit Jahren durch weltweiten Einsatz bewährte Technologie ist die sogenannte „Tuchhaltertechnik“. Dieses patentierte Spannsystem basiert auf die reversiblen Tuchhalter, die einfach auf das zugeschnittene Gewebe aufgeklemmt und anschließend im Spannkanal des Profils eingerastet werden, wodurch es perfekt bis in alle Ecken und Anschlüsse gespannt wird.

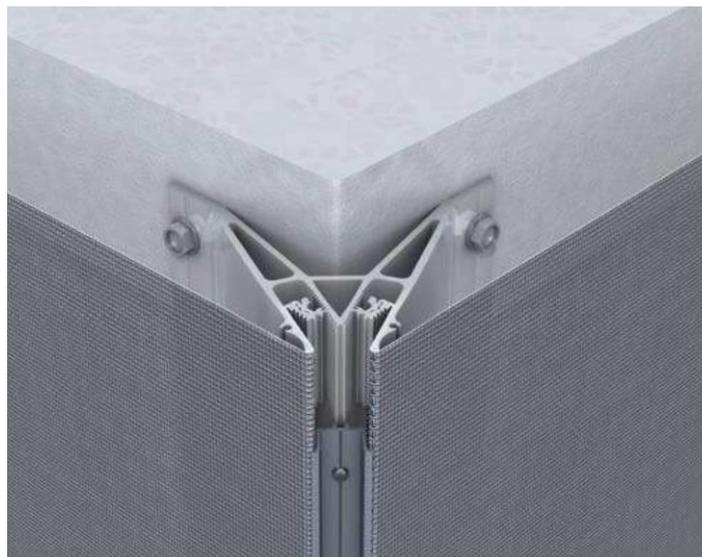


Abbildung 3.6 Tuchhaltertechnik [Quelle: schueco.com]

## 3.2 Ganzglasfassaden

Ganzglasfassaden stellen eine der innovativsten Formen von strukturellen Glasfassaden dar, die vor allem als High-Tech-Konstruktionen, wie das Crystal Cubes in den weltbekannten Apple-Stores, weltweit eingesetzt werden [36]. Diese Fassaden sind ideal, wenn die architektonische Absicht eine maximal erreichbare Transparenz ist. Mit diesen Systemen wird eine komplett rahmenlose und nahezu unsichtbare Fassade geschaffen, die ohne Stahl oder Betonelemente auskommt und vollständige Luftdichtheit, Wasserdichtheit und Wärmedämmung bietet.

Eine der besseren Varianten stellen die Glasfassaden mit Glaslamellen und -trägern dar. Diese Elemente sorgen für die gesamte seitliche und horizontale Stabilität der Gesamtstruktur. Sie werden mit hocheffizientem Struktursilikon und maßgeschneiderten unsichtbaren Beschlägen aneinander befestigt. Das tragende System, die „vertikale Stützstruktur“ der Fassadenverglasung, ist ein „Glasfinnen-/Pfosten-System“, das auf einer durchgehenden, einteiligen, mehrschichtigen Glasfinne (bis zu 16 m lang) basiert. Darauf wird ein maßgefertigtes, stranggepresstes Aluminiumprofil strukturell verklebt [36].

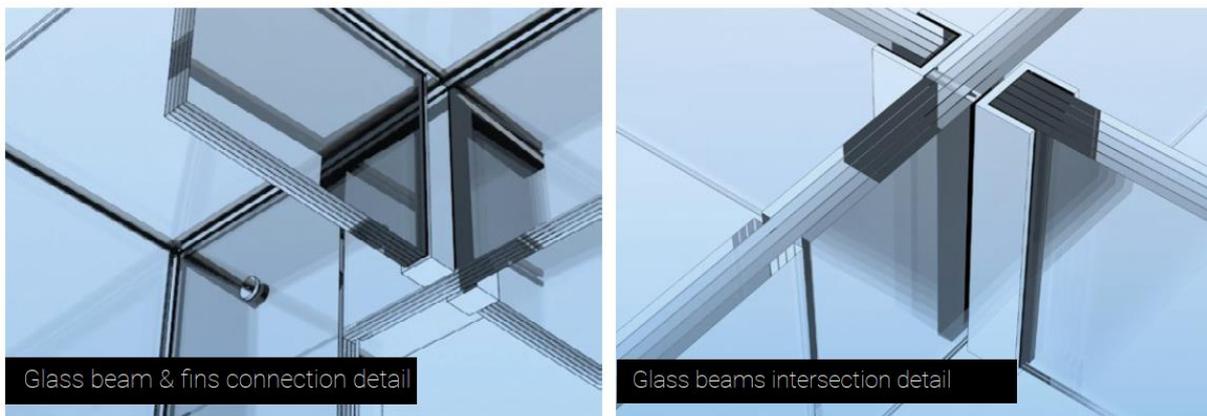


Abbildung 3.7 Detail der Anschlüsse: Glasträger und Lamellen (rechts) und Knotenpunkt zw. Glasträgern [36]

Die Silikonfugen sind an den Ausklinkungen und Klebepunkten so angeordnet, dass die Konstruktion Luft- und Wasserdichtheit gewährleistet. Bei der Bemessung sollte die erforderliche Toleranz für die Durchbiegung aufgrund von Konstruktionslast, Windlast usw. berücksichtigt werden. Die Befestigung der Glaspfosten an die Betonkonstruktion erfolgt über verstellbaren Halterungen. Die endgültige Glasdicke, -art und -zusammensetzung an den verschiedenen Stellen wird so ausgelegt, dass sie den höchsten Sicherheits- und Strukturanforderungen entspricht.

Alle Gläser müssen der angegebenen Qualität entsprechen (It. Normen: EN 572-1, EN 572-4, EN- 572-9, EN 1096 Teile 1, 2, 3, 4). Es können Dreifachverglasungen mit einem K-Wert  $\approx 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  eingesetzt werden. Die Verformung ist innerhalb der vorgegebenen Toleranzen ohne lokale Fehler (z. B. Zangenabdrücke) nach EN 1096-4, EN 572-9 einzuhalten [36].

In der nachstehenden Tabelle sind die Anforderungen angegeben, die für die Bemessungslasten berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 3.1 Anforderungen an die Bemessungslasten [36]

Eigengewicht	Das Eigengewicht wird in der Finite-Elemente-Berechnung berücksichtigt durch die Vorgabe eines Beschleunigungswertes in Schwerkraftichtung.
Windlasten	Nach EN 1991-4 [3] und [4]: Äußere Last auf äußeres Glas & innere Last auf inneres Glas.
Schneelasten	Nach EN 1991-3 [5]
Nutzlast (für begehbare Glas)	Für Wartungszwecke zugängliche Verglasung (nach DIN 18008-6 und DIN 4426): Einzellast einer Person mit Werkzeug [6] $Q_k=1,5\text{kN}$ (Auflagefläche $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ )
Klimalast	Nach DIN 18008
Lastkombinationen	Nach DIN 18008

Die numerische Analyse wird mit der Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt. Für die Berechnung werden repräsentative Glaselemente entsprechend ihrer Geometrie und Spannweite ausgewählt. Auf der nachstehenden Abbildung sind die Ergebnisse einer FEM-Analyse eines Glasträgers sowie einer Glasscheibe dargestellt. Bei einem 300mm hohen Glasträger beträgt die Gesamtverformung unter Bemessungslasten (GZG) und berücksichtigten Imperfektionen von 1/400 maximal 7,4mm. Bei der Glasscheibe ist die Hauptspannungsverteilung innerhalb des lokalen Modells zu sehen, wobei die erwarteten Spannungskonzentrationen bei der Aussparung zu erkennen sind.

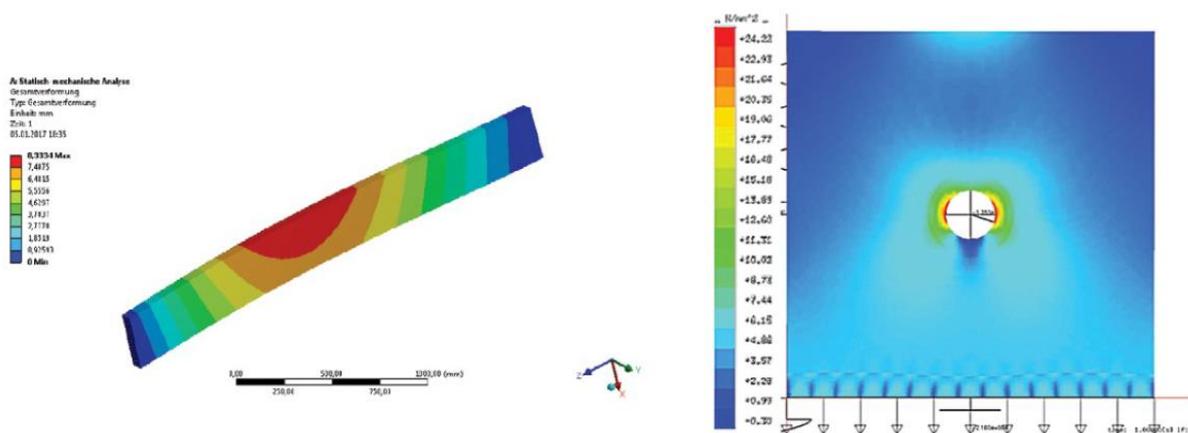


Abbildung 3.8 Ergebnisse einer FEM Analyse: Glasträger (links) und Glasscheibe (rechts) [36]

# 4 Fassadenplanung

## 4.1 Parametrische Planung

Heutzutage wird der Bau einer Fassade immer komplexer. Je mehr sich die einzelnen Bauteile voneinander unterscheiden, desto höher werden die Kosten bei der Herstellung. Nur durch eine Standardisierung der Teile können solche Fassaden wirtschaftlich realisiert werden. Ein Beispiel für eine komplexe Freiform-Fassade ist der RKM 740 Tower in Düsseldorf Heerdt. Das Ziel war es, mit Hilfe der parametrischen Planung die Produktion der Fassade wirtschaftlich umzusetzen. Wie diese Technik zum Einsatz kommt, wird anhand des RKM Towers gezeigt.

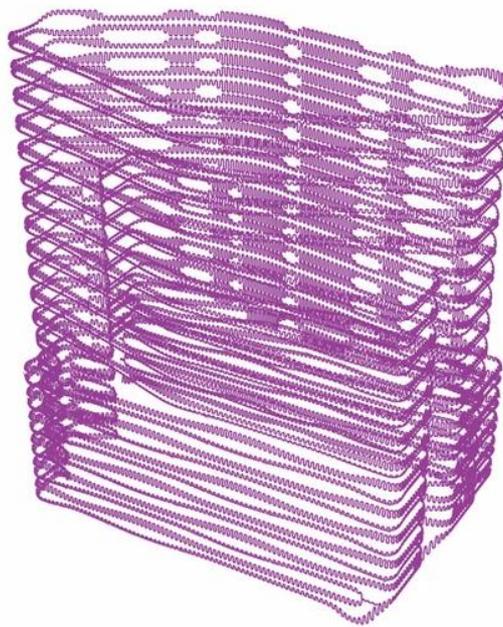


Abbildung 4.1 RKM 740 Tower in Düsseldorf (3-D Modell der Fassade) [Quelle: imagine-computation.com]

### Was ist Parametrische Planung?

Parametrik ist im Grunde die Fähigkeit, komplexe Abhängigkeiten mit wenigen Eigenschaften zu steuern. Parametrische Planung bedeutet also, das Festlegen eines Verhaltens eines Bauteiles oder einer -Gruppe, wenn eine Veränderung durchgeführt wird [33]. Betrachten wir zum Beispiel ein Fensterelement, das zuerst über ein Rechteck definiert ist und alle Profile, Dichtungen und Schrauben hängen von diesem Rechteck ab. Wenn wir die Form dieses Fensters ändern, müssen wir auch bestimmen, wie die anderen Elemente mitwachsen.

Bei den Projekten, die viele einzelnen Bauteile haben, wird die Parametrische Planung sehr wichtig. Mit dieser Methode wird die Modellierung jedes einzelnen Elementes vermieden. Besitzt man stattdessen eine gemeinsame Logik der Teile und verändert nur die Parameter, können über einen sehr kleinen Arbeitsschritt alle diese Elemente auf einmal erfasst werden. Je nach Komplexität der parametrischen Definition kann man dem System weitere Informationen hinzufügen: Größe, Gewicht, Einfluss auf die Statik und so weiter [33].

### Anwendung der Parametrischen Planung am RKM 740 Tower

Die Fassade ähnelt einem Wolken-Kleid, das seine Reißverschlüsse in Richtung Norden gegen den Lärm verschließt und in Richtung Süden zum Rhein und zur Sonne hin öffnet. Für dieses Projekt haben Planer und Architekten sehr viel Zeit investiert und mit verschiedenen Materialien und 3-D Geometrien experimentiert, um eine wirtschaftliche Lösung zur Realisierung der Fassade zu finden. Das Resultat waren zweidimensional gebogene und perforierte Aluminium-Wellen. Mit Hilfe der Parametrischen Planung konnte man diese Metall-Lamellen standardisieren und kostengünstig umsetzen.

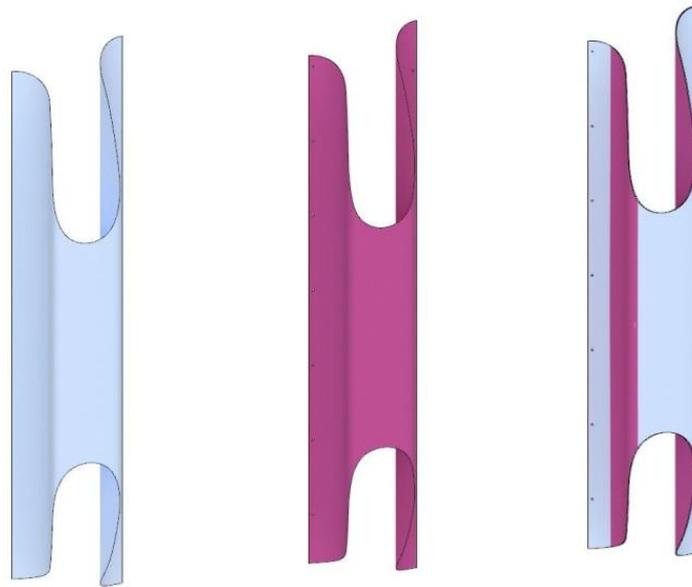


Abbildung 4.2 Modelle der Fassade für das RKM Tower [33]

Auf der Abbildung 4.2 ist das Architekten-Modell der Fassade in blau und die Überarbeitung durch die Firma Imagine Computation (3-D Planung der komplexen Bauten) in violett dargestellt. Die Fassadenelemente wurden aus gekurvten, ausgeschnittenen Zipper-Elementen aus Metall hergestellt. Dabei sollte die geometrische Struktur des Architekten so umgesetzt werden, dass sie über einen Kantprozess mit großen Radien dargestellt werden konnte. Die Herstellung dieser Elemente erfolgte mit einer speziellen Maschine, wobei die Bleche zuerst zugeschnitten, danach leicht vorgewalzt und abschließend an der Kantbank umgeformt wurden.

Mit Hilfe der Parametrischen Planung konnten die Metall-Lamellen standardisiert werden. Auf dieser Weise wurde der Fassadenplan „maschinenlesbar“ gemacht und so war es möglich, den Prozess zu vereinfachen und die komplexe Freiform wirtschaftlich herzustellen.

Die Fassade ist eine Doppelfassade, also einmal eine dunkle Wetterschale gegen Schlagregen und die davor gelagerte gelochte Aluminiumwelle, die über eine gemeinsame Konsole am Rohbau angebracht ist. Dazu kamen Glasgeländer und Glasschiebdrehelemente. Alle diese Elemente wurden über eine gemeinsame Konsole am Rohbau angebracht. Man musste daher extra eine passende Konsole entwickeln, die der hohen statischen und konstruktiven Herausforderungen gewachsen war. Sie musste zudem eine Montagegenauigkeit von 1 bis 2 mm erreichen. Man hat sogar diese Elemente im Windkanal mit Eins-zu-Eins-Mustern untersucht, um zu sehen, ob die gelochten Elemente nicht bei Wind zu pfeifen begannen [33].

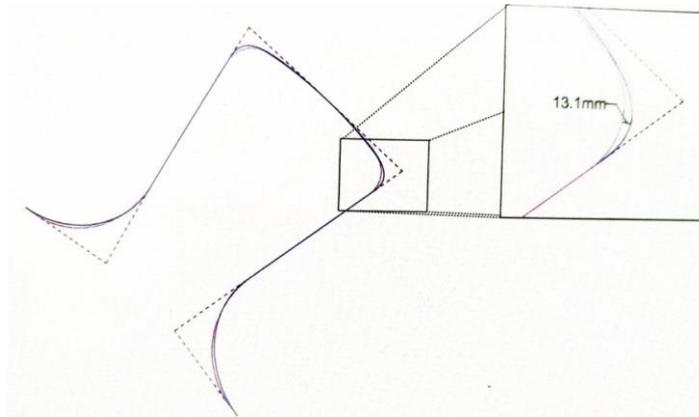


Abbildung 4.3 Überarbeitung der Architektengeometrie [33]

Auf der Abbildung 4.3 ist zu sehen, wie die Zusammenarbeit zwischen Architekten und 3D-Modellierer abläuft. Die Kurve der Architekten (blau) ändert stetig ihren Krümmungsverlauf. Diese Figur wird „Spline“ genannt. Diese Kurve wurde dann von 3D-Modellierer zu einer passenden Formengenährt.

### Fazit

Zusammenfassend kann man sagen, dass die komplexen Fassaden mit einer Parametrischen Planung sehr wirtschaftlich realisiert werden können. In Zukunft werden Fassaden immer mehr Aufgaben erfüllen müssen. Immer mehr intelligente Komponenten und Materialien werden integriert werden, etwa um das Gebäude energieeffizienter zu realisieren. Um dies wirtschaftlich zu halten, wird die Parametrische Planung benötigt.

Die Architekten werden immer mehr dreidimensional arbeiten müssen, damit die Fassadenhersteller die oft geforderten organischen Formen umsetzen können. Nur auf dieser Weise wird jede freigeformte, komplexe Fassade wirtschaftlich realisierbar.

## 4.2 Computergestütztes Design von kaltgebogenen Glasfas-

### saden

Mit gebogenen Glasfassaden wird Realisierung von ästhetisch beeindruckenden Looks für architektonische Meisterwerke ermöglicht. Ihre Realisierung ist jedoch typischerweise ein aufwändiger und teurer Prozess, bei dem Glasscheiben erhitzt und in Form gebracht werden. Kalt gebogene Glasverkleidungen sind eine kostengünstige Alternative, deren Herstellung durch das Anbringen von ebenen Glasscheiben an gebogenen Rahmen erfolgt. Wichtig dabei ist, dass die auftretenden Spannungen innerhalb sicherer Grenzen gehalten werden. Es ist jedoch eine rechnerische Herausforderung, sich im Entwurfsraum von kalt gebogenen Glaspaneelen zurechtzufinden. Angesichts der Zerbrechlichkeit des Materials, ist es sehr schwierig, herstellbare und dennoch ästhetisch ansprechende Formen für kalt gebogene Glasfassaden zu finden [37].



Abbildung 4.4 Beispiele von gebogenen Glasfassaden; links: Fondation Louis Vuitton, Paris von Frank Gehry; rechts: Opus, Dubai von Zaha Hadid Architects [Quelle: google.com]

Ein Team von Wissenschaftler/innen des IST Austria, der TU Wien, der UJRC und der KAUST entwickelte eine Software, der sich auf interaktive, datengesteuerte Ansätze für den Entwurf von kalt gebogenen Glasfassaden basiert. Dieser Ansatz lässt sich nahtlos in eine typische architektonische Entwurfspipeline wie Rhino integrieren.

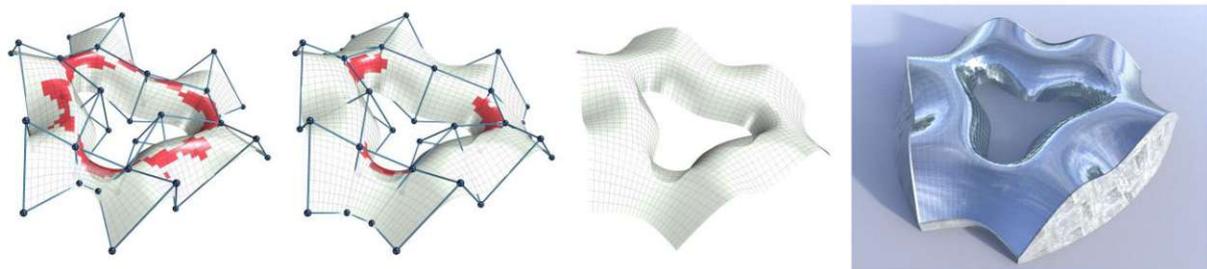


Abbildung 4.5 Entwurfsprozess mit parametrischen Oberflächen [37]

Diese Methode erlaubt es auch Laien, eine parametrische Oberfläche interaktiv zu bearbeiten, die ein Zielentwurf repräsentiert und gleichzeitig Echtzeit-Feedback über die Verformungsform und die maximale Spannung von kalt gebogenen Glasscheiben liefert, die sich dieser Oberfläche annähert. Darüber hinaus bietet das Werkzeug die Möglichkeit des inversen Entwurfes.

An jedem Punkt des Entwurfsprozesses kann die parametrische Oberfläche automatisch verfeinert werden, um verschiedene Fairnesskriterien wie Glätte oder Nähe zu einer Referenzoberfläche zu minimieren. Maximale Spannungen werden innerhalb realistischer Grenzen für Glas gehalten [37]. Diese Methode gibt einen realisierbaren Entwurf aus, ohne dass planare Paneele zugeschnitten und in Rahmen eingebaut werden müssen. Auf technischer Ebene stützt sich dieser Ansatz auf die physikalische Simulation, um eine genaue Abschätzung der verformten sowie unverformten Form und die daraus resultierende Spannung einer Glasscheibe zu erhalten, die an einem gebogenen Rahmen befestigt ist. Dies ist nicht trivial, da die Plattenränder keine Informationen über die unverformte Form vermitteln. Außerdem gibt es für einen gegebenen Rand eine unbekannte Anzahl von verschiedenen, aber gültigen Gleichgewichten.

Auf der nachstehenden Abbildung ist ein Arbeitsablauf über den Workflow für Designtool dargestellt.

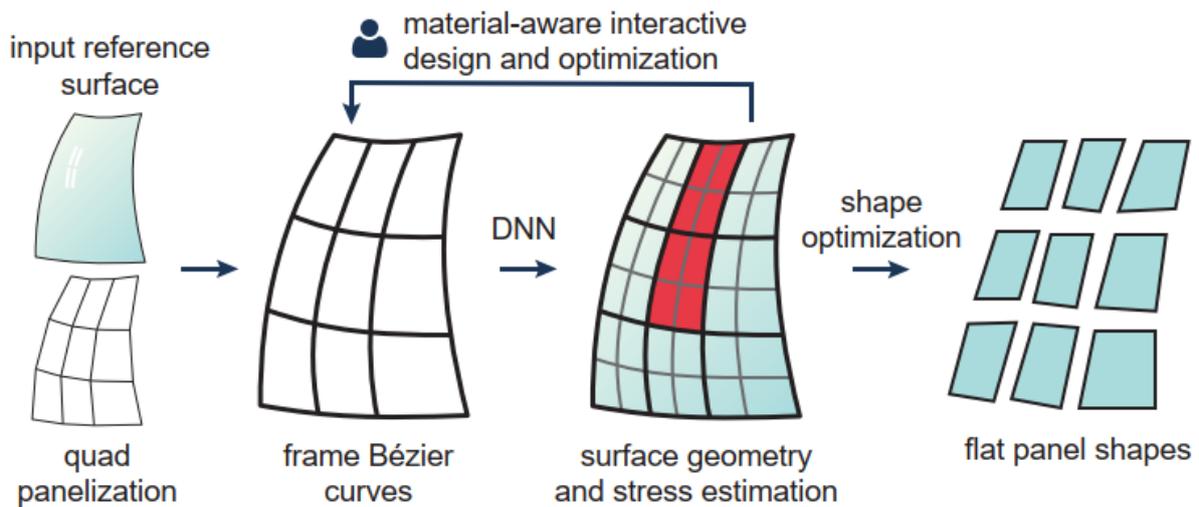


Abbildung 4.6 Überblick über den Arbeitsablauf für Design-Tool [37]

Um interaktive Raten zu ermöglichen, approximiert man die physikalische Simulation mit einem tiefen neuronalen Netzwerk, das in der Lage ist, Multimodalität zu handhaben und für mehr als eine Million Simulationen trainiert ist.

Der Benutzer nimmt Bearbeitungen an einem viereckigen Grundnetz vor und erhält sofort eine Rückmeldung über die verformte Form und die maximale Spannung der Glasscheiben. Bei Bedarf verfeinert ein Optimierungsverfahren interaktiv die Oberfläche, um Sicherheits- und Fairnesskriterien zu minimieren. Falls gewünscht, kann eine beliebige Zielreferenzfläche zur Initialisierung des Prozesses verwendet werden [37].



Abbildung 4.7 Herstellung einer doppelt gekrümmten Fläche mit 3x3 kalt gebogenen Platten zur Validation der Ergebnisse [37]

Eine Validation der Ergebnisse erfolgt so, dass Glasplatten zu einer doppelt gekrümmten Fläche hergestellt und kalt gebogen werden. Vergleiche der erstellten Modelle mit Vorhersagen anhand von Laserscans zeigen eine hervorragende Übereinstimmung.

### Fazit

Durch die Kopplung vom geometrischen und fertigungsgerechten Entwurf, bietet dieses System einen neuartigen und praktischen Arbeitsablauf, der es ermöglicht, effizient einen Kompromiss zwischen wirtschaftlichen, ästhetischen und technischen Aspekten zu finden. Es wäre auch interessant, den Design-Workflow durch neue Funktionen zu erweitern, wie z. B. durch das Hinzufügen von Funktionen für streng lokale Bearbeitungen, das Markieren einiger Paneele als a priori heiß gebogen oder das Festlegen von Knickkanten. Dieser Workflow könnte als Inspiration für viele andere materialbewusste Designprobleme dienen. Es wäre ebenfalls für zukünftige Arbeiten spannend, Erweiterungen auf andere Materialien zu erforschen, z. B. Metall oder Holz.

Abschließend kann man feststellen, dass diese Methode den praktischen Bedarf an warm gebogenen Platten erheblich reduziert und so die Realisierung von Glasfassadendesigns ermöglicht, die sonst unerschwinglich gewesen wären.

## 5 Swatch Hauptquartier

Das Projekt ist nach einem Wettbewerb vom „Shigeru Ban Architects Europe“ entworfen worden. Bauherr ist „Swatch Group“. Die komplexe Fassade wurde von den Firmen „Leicht“ und „Roschmann“ geplant.



Abbildung 5.1 Swatch Gebäude in Biel, Schweiz [Quelle: google.com]

Es handelt sich um eine relativ weit gespannte Holzgitterschale, die von der linken Seite, wo das Hauptquartier von Swatch ist, über die Straße gespannt und auf der anderen Seite mit einem bestehenden Museumsgebäude verbunden ist. Die Gesamtfläche der Holzgitterschale beträgt circa 11000m<sup>2</sup>, die Länge 240m und die Breite 34m. Die maximale Höhe über der Straße ist 27m.

Das Tragsystem besteht aus 4610 gefrästen Brettschichtholzträgern. Alle Träger sind auf einer fünfschigen CNC-Fräsmaschine vorbereitet und anschließend auf der Baustelle auf einem Lehrgerüst montiert. Diese Holzkonstruktion ist abschließend mit vormontierten Fassadenelementen gefüllt worden. (siehe die nachstehende Abbildung).



Abbildung 5.2 Hautträger (links) und vormontierte Fassadenelemente (rechts) [38]

In die Holzgitterschale sind unterschiedliche Fassadenelemente eingesetzt worden, wobei es insgesamt 9 verschiedenen Typen und knapp 2800 Stück gibt. Einige davon sind opake Elemente mit und ohne Photovoltaik, ETFE Elemente mit Polykarbonatscheiben als aufgeblasene Membranen und Glaselemente mit Verschattungselementen, damit man von drinnen nach draußen oder umgekehrt schauen kann.

Aufgrund der Geometrie sind alle diese Elemente unterschiedlich, das heißt, es gibt keine zwei gleichen.



Abbildung 5.3 Verschiedene Fassadenelemente [38]

#### *Design-to-Production: Digitale Planung*

Die Fassade wurde digital geplant und modelliert, wobei sich folgende Herausforderungen ergeben haben:

- Da es sich um eine große, gekrümmte Gitterschale handelt und es keine gleichen Teile gibt, brauchte man ein digitales Produktionsmittel, um diese Bauteile einigermaßen effizient und präzise anfertigen zu können. Das heißt, dass alle individuellen Teile komplett produktionsreif digital modelliert worden sind.
- Fertigungstoleranz ist im 1/10mm-Bereich: die typische Produktionstoleranz im Holzbau für einen 10 m langen gekrümmten Träger liegt ungefähr bei 0,5mm. Daher war eine sehr hohe Präzision erforderlich, damit das System am Ende statisch funktionieren konnte und vom Prüfstatiker angenommen wurde.
- Detailierung bis zum letzten Bohrloch: alle Bohrlöcher mussten ebenfalls digital modelliert werden. In der Holzgitterschale steckten insgesamt mehr als 140.000 Verbindungsmittel, die alle im digitalen Modell geplant wurden.
- Montagetoleranz im mm-Bereich: die Fassadenelemente, die bis 2x2m groß sind, mussten sehr präzise vorgefertigt werden, damit die Montage reibungslos funktionieren konnte.
- Die Fassade hat sehr viele integrierte Funktionen. Einerseits musste sie als Bürofassade funktionieren, andererseits mussten zahlreiche Installationen in diese Fassade integriert werden. Aus diesem Grund war die Modellierung noch komplizierter und alle Planungsbeteiligten mussten von Anfang an gemeinsam koordinieren.

Da es insgesamt 2800 Fassadenelemente gibt, wurde ein spezielles Referenzmodell der Fassade gebaut, um die genauen Positionen von diesen Elementen definieren zu können. Dabei wurde ebenfalls ein spezielles Nummerierungssystem entwickelt, da eine einfache Nummerierung von 1 bis 2800 sinnlos wäre. Die Lösung war eine zweiachsige Nummerierung, wobei der einen Trägerachse gerade und der anderen ungerade Nummer zugeordnet wurden. Dieses Nummerierungssystem hat gut funktioniert und wurde bis zur Baustelle durchgezogen.

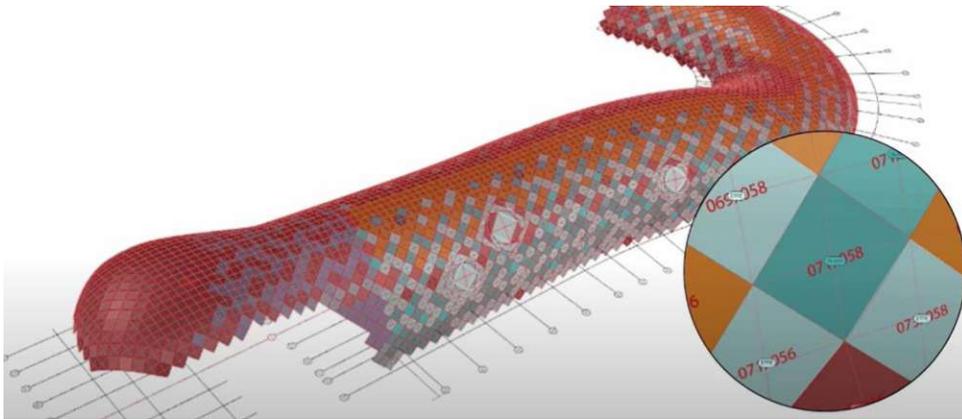


Abbildung 5.4 Referenzmodell der Fassade und Nummerierungssystem [39]

### Verbindung von Hauptträgern

Innerhalb der Holzgitterschale gibt es vier Trägerebenen, die sich ungefähr alle zwei Meter kreuzen. Durch diese Kreuzungsknoten sollten dann die Installationen durchgeführt werden. Da alle Träger gekrümmt sind und alle Knoten unterschiedliche Winkel haben, war eine übliche Blattverbindung von den Trägern nicht möglich. Pro Träger gibt es bis zu fünf Anschlusspunkte, die gekrümmt sind und daher unterschiedliche Richtungen aufweisen. Dieses Problem wurde relativ einfach mit einer neu erfundenen Blattverbindung gelöst. Die Verbindung funktioniert genauso wie übliche Blattverbindung, aber die Knoten können bis zu einem gewissen Winkel gedreht werden. Die Lösung ist auf der nachstehenden Abbildung dargestellt.

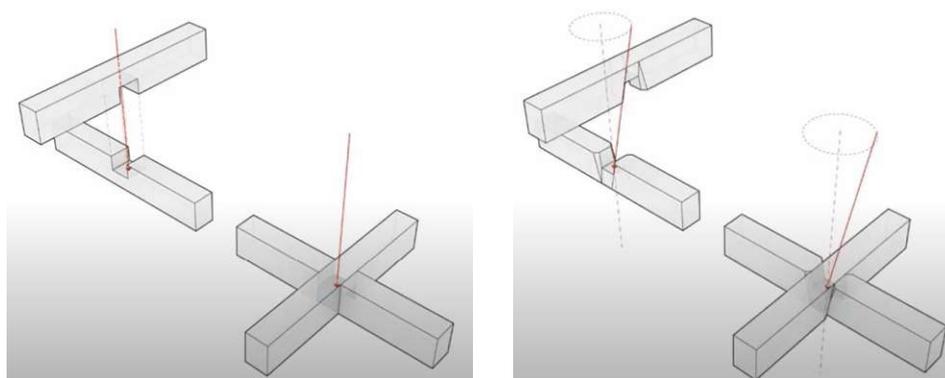


Abbildung 5.5 Blattverbindung (links) und Anpassung (rechts) [39]

Eine der Ideen beim Entwurf war, dass die Funktionen der Fassadenkonstruktionen sauber voneinander getrennt werden. Das heißt, oben gibt es eine Schicht der Fassade mit Glaselementen, dann unterhalb Installationen mit allen Rohren und Elektroleitungen und abschließend das Tragwerk aus Holz. Ein großer Nachteil dieser Idee war die gesamte Höhe von circa 1,5m, womit man viel Platz verloren würde, da man nicht mehr weiter nach außen bauen konnte. Insgesamt würden circa. 400m<sup>2</sup> Nutzfläche auf diese Schichten verloren gehen. Weitere stellte sich heraus, dass die großen Holzgitterschalen die Lichtdurchlässigkeit stören. Aus diesen Gründen musste man ein anderes Konzept entwickeln. Die Lösung war die Integration aller Funktionen in die Fassade und das Zusammenschieben der Elemente in die Holzkonstruktion. Die statische Höhe der Tragkonstruktion wurde dabei eingehalten und alle Installationen nach unten geschoben. Als Ergebnis wurde 33% mehr Platz für den Innenraum geschaffen und die Belichtung war ausreichend. Hingegen hatte man aber drei Mal so viel Koordinationsaufwand, da alle diese Installationen überall aneinander vorbeilaufen müssen.

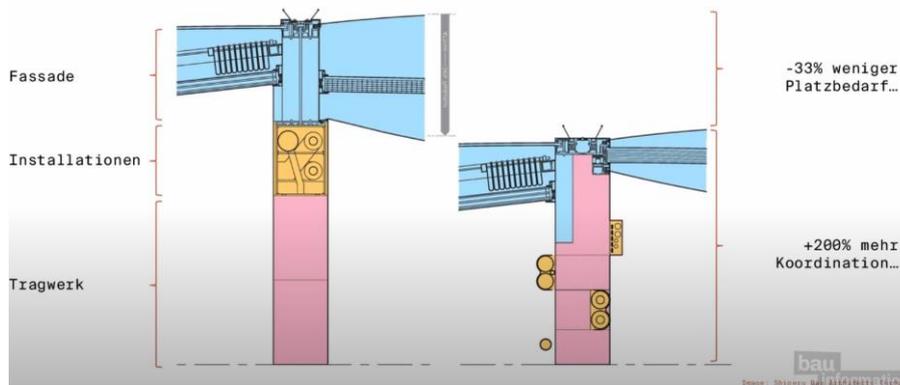


Abbildung 5.6 Getrennte und integrierte Funktionen [38]

Insgesamt gibt es vier Installationsebenen für Sprinkler, Luft, Wasser und Elektro entlang der Träger. Diese Lösung erforderte am Ende 5000 Durchbrüche in der Konstruktion, womit die Tragfähigkeit der Konstruktion beeinflusst wurde. All diese Öffnungen mussten vorher geplant werden, da keine nachträglichen Bohrungen von Ingenieuren erlaubt wurden. Am Ende hat man es geschafft, einen Flachplan zu erstellen, wo man sieht welche Leitungen wo und in welche Richtung laufen. Dies wurde mit einer Software verwirklicht, die Flachmodelle zu 3D-Modelle transformiert und umgekehrt.

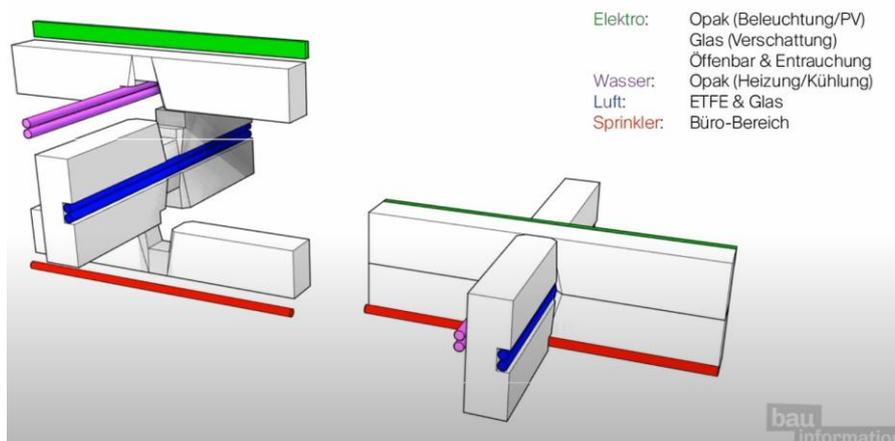


Abbildung 5.7 Integration von TGA und Tragstruktur [38]

## 6 Zusammenfassung

### Fassadenmaterialien

Es gibt zahlreiche neue und innovative Materialien, mit deren Anwendung Realisierung von komplexen und parametrischen Fassadenformen ermöglicht wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Zusammenstellung wichtiger Fassadenmaterialien und deren Entwicklungen aufgezeigt. Vor Allem wurden für jeden dargestellten Werkstoff, die wichtigsten Eigenschaften sowie deren Einsatz im Fassadenbereich dargestellt. Gezeigt wurde, welche Anforderungen und Kriterien die jeweiligen Materialien erfüllen müssen, um diese bei der Realisierung einer Fassade einsetzen zu können. Mit der dekonstruktivistischen Bauweise und der parametrischen Planung werden immer mehr komplexe und anspruchsvolle Fassadensysteme entstehen. Daher sind innovative Produkte und Entwicklungen von Fassadenmaterialien unabdingbar.

### Fassadensysteme

Die Verwirklichung von komplexen Fassadenformen erfordert spezielle Fassadensysteme. Diese können mit Membransystemen und Ganzglasfassaden realisiert werden. Durch die Verwendung von speziell entwickelten Beschichtungen, können die Eigenschaften der Gewebe verbessert werden. Dies wurde mit den luftfilternden textilen Fassaden aufgezeigt. Mit den Ganzglasfassaden wurde demonstriert, dass der Verwendung des Glases als Fassadenmaterial keine Grenzen gesetzt sind. Mit entsprechenden Unterkonstruktionen sind parametrische Fassadenformen verwirklichtbar.

### Fassadenplanung

Um die freigeformten Fassaden realisieren zu können, werden neben den innovativen Materialien und Systemen, fortgeschrittene Planungsmethoden benötigt. In dieser Arbeit wurde anhand von bereits realisierten Projekten, der Ablauf der parametrischen Planung aufgezeigt. Feststellen kann man, dass mit dieser Planungsmethode, die komplexen Fassaden wirtschaftlich realisiert werden können.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Dipl.-Ing. Stefan Heeß, Wiesbaden; Ausschreibungshinweise für farbigen Sichtbeton [online]  
<https://www.dyckerhoff.com/-/ausschreibungshinweise-fur-farbigen-sichtbeton>  
(Abrufdatum 11.11.2020)
2. Herzog T.; Krippner R.; Lang W.: Fassadenatlas. Edition Detail, 2. Auflage, 2016
3. Peck M.; Bosold D.: Sichtbeton – Techniken der Flächengestaltung. Informations-Zentrum Beton GmbH [online]  
<https://www.beton.org/service/zement-merkblaetter/> (Abrufdatum 11.11.2020)
4. BAG Bauartikel GmbH: Strukturmatrizen. [online]  
<https://www.bagbauartikel.com/strukturmatrizen/> (Abrufdatum 12.11.2020)
5. InformationsZentrum Beton GmbH. Beton.org [online]  
<https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/sichtbeton/> (Abrufdatum 13.11.2020)
6. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hofstadler C.: Angewandte Sichtbeton Normen, Richtlinien und Merkblätter in der österreichischen Baupraxis. 13. Kasseler Baubetriebsseminar Schalungstechnik. [online]  
[https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Institute/BBW/images/Publikationen/sichtbeton/Regelwerke.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/BBW/images/Publikationen/sichtbeton/Regelwerke.pdf) (Abrufdatum 13.11.2020)
7. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB): Richtlinie Sichtbeton - Geschalte Betonflächen inkl. Gütezeichen "Fachbetrieb für Sichtbeton"; Ausgabe: November 2009
8. Stanecker Betonfertigteilwerk GmbH. [online]  
<https://www.stanecker.de/sichtbetonfassade/> (Abrufdatum 20.11.2020)
9. Rider Sales GmbH: Fassaden Guide, Edition 11/2020. [online]  
<https://www.rieder.cc/de/unternehmen/downloads/> (Abrufdatum 22.11.2020)
10. Equitone – Fibre cement facade materials: Planung und Anwendung Equitone [linea], Ausgabe 10/2020. [online]  
<https://www.equitone.com/de-at/downloadcenter/> (Abrufdatum 25.11.2020)
11. Wikipedia: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) [online]
12. Baunetzwissen: [www.baunetzwissen.de](http://www.baunetzwissen.de) [online]
13. Equitone – Fibre cement facade materials: Planung und Anwendung Equitone Fassadentafeln, Ausgabe 10/2020 [online]  
<https://www.equitone.com/de-at/downloadcenter/> (Abrufdatum 01.12.2020)
14. Innovative Fassadentechnik. Ausgabe 2017 II. Ernst & Sohn (Hrsg.)
15. ETA-18/0388 vom 1. April 2020: Corian Fassadenplatte; Corian Fassadensystem für hinterlüftete Fassaden [online]  
<https://www.exteriors.corian.de/IMG/pdf/eta-18-0388.dt.pdf> (Abrufdatum 01.12.2020)
16. Product bulletin EMEA / English: Dupont™ Corian® as an external cladding solution. [online]  
[https://www.corian.uk/IMG/pdf/emea\\_corian\\_ec\\_techbulletin\\_uk.pdf](https://www.corian.uk/IMG/pdf/emea_corian_ec_techbulletin_uk.pdf) (Abrufdatum 04.12.2020)
17. Chemie.de [online]
18. Archi Expo: [www.archiexpo.de](http://www.archiexpo.de) [online]  
<https://www.archiexpo.de/prod/m-r-manufaktur-gmbh/product-150256-1955164.html> (Abrufdatum 06.12.2020)

19. Fachzeitschrift: Fassadentechnik, Ausgabe 1/2014
20. Datenblatt: Lamilux Fassadenplatte, Stand 2017-07 [online]  
[https://www.scobalit.ch/fileadmin/Bilder/scoba\\_glas/datenblatt-lamilux-fassadenplatte-082017.pdf](https://www.scobalit.ch/fileadmin/Bilder/scoba_glas/datenblatt-lamilux-fassadenplatte-082017.pdf) (Abrufdatum 08.12.2020)
21. DIBt, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung, Nummer Z-10.3-726. [online]  
[https://www.dibt.de/pdf\\_storage/2019/Z-10.3-726%281.10.3-726%212%29.pdf](https://www.dibt.de/pdf_storage/2019/Z-10.3-726%281.10.3-726%212%29.pdf) (Abrufdatum 10.12.2020)
22. Prospekt: Lamilux Fassadenplatte, Stand 2013-03 [online]  
[https://www.lamilux.it/fileadmin/user\\_upload/dateien/F-Kunststoffe/Service/Downloads/Prospekte-Flyer/de/LAMILUX\\_Fassadenplatte\\_Prospekt\\_201303.pdf](https://www.lamilux.it/fileadmin/user_upload/dateien/F-Kunststoffe/Service/Downloads/Prospekte-Flyer/de/LAMILUX_Fassadenplatte_Prospekt_201303.pdf) (Abrufdatum 15.12.2020)
23. kunststoffplattenonline.de; [online]
24. Resopal® Facade: Produktdatenblatt HPL nach DIN EN 438-6 [online]  
<https://www.resopal.de/resources> (Abrufdatum 17.12.2020)
25. kunststoffplatten24.at [online]
26. oekologisch-bauen.info [online]
27. vhi.de [online]
28. Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804: WPC-Fassadenelemente; Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e.V. [online]  
<https://vhi.de/wp-content/uploads/2014/05/WPC-Fassadenelemente.pdf> (Abrufdatum 22.12.2020)
29. fassaden-dach.de [online]
30. holzistgenial.at [online]
31. Tabelle-Plattenwerkstoffe; infoholz.at [online]  
[https://www.infoholz.at/fileadmin/infoholz/media/datenblaetter\\_hfa\\_pdfs/Tabelle\\_Plattenwerkstoffe.pdf](https://www.infoholz.at/fileadmin/infoholz/media/datenblaetter_hfa_pdfs/Tabelle_Plattenwerkstoffe.pdf) (Abrufdatum 10.01.2021)
32. Facid; Die flexible Fassade von Schüco; Ausgabe 06/2020 [online]  
<https://www.schueco.com/web2/blob/28930666/46b7d53389e6884ab27e77cf740aa2e0/broschuere-facid-pdf-data.pdf> (Abrufdatum 20.01.2021)
33. Fachzeitschrift: Fassadentechnik, Ausgabe 6/2020
34. Rochoarchitecture.com [online]
35. Katalog: Textil Druckbogen [online]  
[https://api.wmedia.ch/wp-content/uploads/2017/11/11\\_Textil\\_Druckbogen\\_DE.pdf](https://api.wmedia.ch/wp-content/uploads/2017/11/11_Textil_Druckbogen_DE.pdf) (Abrufdatum 05.02.2021)
36. Glasscon: Structural Glass Facades; All Glass Fins & Beams [online]  
[https://de.glasscon.com/sites/default/files/documents/products/glasscon\\_structural\\_glass\\_facades\\_-\\_all\\_glass\\_fins\\_and\\_beams.pdf](https://de.glasscon.com/sites/default/files/documents/products/glasscon_structural_glass_facades_-_all_glass_fins_and_beams.pdf) (Abrufdatum 07.03.2021)
37. Gavril K.; Guseinov R.; Perez J.; Pellis D.; Henderson P.; Rist F.; Pottmann H.; Bickel B.: Computational Design of Cold Bent Glass Facades [online]  
<https://arxiv.org/pdf/2009.03667.pdf> (Abrufdatum 15.04.2021)
38. bauinformation.com [online]
39. beton.tuwien.ac.at [online]  
<https://www.betonbau.tuwien.ac.at/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/uhpc-austria/> (Abrufdatum 18.05.2021)
40. Präsentation: Besondere Berone: Leichtbeton – UHPC; TU Wien
41. Himacs.er/de/leonardo-glass-cube [online]
42. Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt; Städtebau & Architektur; Hochbauamt: Museum der Kulturen Basel. Sanierung und Erweiterung [online]

[https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwjY7tu\\_ydjwAhVNuKQKHU9mDJYQFjABegQIB-hAD&url=https%3A%2F%2Fwww.hochbauamt.bs.ch%2Fdam%2Fjcr%3A3d2a23fd-ea2a-4cc6-bc09-7b0c79d1c860%2FMuseum%2520der%2520Kulturen.pdf&usg=AOvVaw0JnmmK-54j3WSplNmC8l\\_q](https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwjY7tu_ydjwAhVNuKQKHU9mDJYQFjABegQIB-hAD&url=https%3A%2F%2Fwww.hochbauamt.bs.ch%2Fdam%2Fjcr%3A3d2a23fd-ea2a-4cc6-bc09-7b0c79d1c860%2FMuseum%2520der%2520Kulturen.pdf&usg=AOvVaw0JnmmK-54j3WSplNmC8l_q) (Ab-  
rufdatum 20.05.2021)

43. Zpfung.ch [online]

44. Materialmagain.com [online]

45. Präsentation: Stahl. Wetterfeste Baustähle; TU Wien

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Sichtbetonklassen SB – Gesamtanforderung an das Sichtbetonbauwerk (die klassenbildenden Anforderungen sind grau hinterlegt) [7] .....	16
Tabelle 2.2 Physikalische Eigenschaften des Materials „fibreC“ [9] .....	20
Tabelle 2.3 Technische Daten der Faserzementplatte „linea“ .....	25
Tabelle 2.4 Corian EC Glacier White - Abmessungen, Materialien und physikalische Eigenschaften [15].....	29
Tabelle 2.5 Auswirkungen von Temperaturschwankungen auf die Biegeeigenschaften der Corian Fassadenplatten – Verhältnis für den Einfluss der Temperatur [15].....	30
Tabelle 2.6 Effekte von Frost-Tau-Wechsel auf die Biegeeigenschaften der Corian Fassadenplatte – Verhältnis der Effekte von Frost-Tau-Wechsel [15] .....	30
Tabelle 2.7 Effekte von UV-Belastungen auf die Biegeeigenschaften der Corian Fassadenplatte – Verhältnis der Effekte von UV-Belastungen [15].....	30
Tabelle 2.8 Eigenschaften der „lamilux“ Fassadenplatten [21] .....	38
Tabelle 2.9 Grundstoffe der WPC-Fassadenelementen [28].....	42
Tabelle 2.10 Bautechnische Daten der WPC-Fassadenplatten [28].....	43
Tabelle 2.11 Eigenschaften von Metallwerkstoffen (Auswahl), Sortierung aufsteigend nach Ordnungszahlen der Elementarmetalle [2] .....	45
Tabelle 2.12 Ausgewählte Kenngrößen verschiedener Holzwerkstoffe [Quelle: waldwissen.net] .....	48
Tabelle 2.13 Zusammensetzung vom Glas lt. EN 572-1 [2].....	50
Tabelle 2.14 Allgemeine physikalische Eigenschaften von Glas [2] .....	51
Tabelle 3.1 Anforderungen an die Bemessungslasten [36] .....	62

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Beton-Mikrostruktur (links) und Sichtbeton mit grauem bzw. weißem Portlandzement bei gleichen Gesteinskörnungen (rechts) [1].....	9
Abbildung 2.2 Bestandteile des UHPC [40].....	10
Abbildung 2.3 Typologische Zuordnung „Beton in der Fassade“ [2].....	11
Abbildung 2.4 Brettstruktur sägerau, ungehobelte Bretter (links) und schalungsglatte Oberfläche mit Elementstößen (rechts) [3].....	13
Abbildung 2.5 Schalungsmatrizen [4].....	13
Abbildung 2.6 Betonoberfläche mit Gummi-Matrize texturiert und schwarz gestrichen – Universitätsbibliothek in Utrecht, 2004, Architekt: Weil Arets, Maastricht (links) und OSB-Platten geschalte Oberfläche mit Kante (rechts) [3].....	14
Abbildung 2.7 Wohnhäuser in Herrliberg am Zürichsee, 2005, Architekten: Burkhalter Sumi, Zürich [3].....	17
Abbildung 2.8 Ibere Camargo Foundation in Porto Alegre, 2006, Architekt: Alvaro Siza Vieira, Porto [3].....	17
Abbildung 2.9 MuCEM in Marseille links und Fassadendetail (rechts) [Quelle: pinterest.com] ...	18
Abbildung 2.10 Ultrahochfester Glasfaserbeton [Quelle: heinze.de].....	19
Abbildung 2.11 Äquivalenzfaktoren (Umweltindikatoren): a) Primärenergie (PENRT); b) globale Erwärmung (GWP); c) Versäuerung (AP) [9].....	20
Abbildung 2.12 Fassadenplatten des LLC Library and Learning Center, Universität Wien, Österreich [9].....	21
Abbildung 2.13 Melis Stokelaan, Den Haag, Niederlande [9].....	21
Abbildung 2.14 „formparts“ Betonlamellen [9].....	22
Abbildung 2.15 cast-dreidimensionale Fassade, Wohngebäude Lontoonkatu, Helsinki, Finnland [9].....	22
Abbildung 2.16 Befestigung mit Hinterschnittankern (links) und mit Rider Power Anchore (rechts) [9].....	23
Abbildung 2.17 Befestigung mit Kleben (links) und mit Nieten (rechts) [9].....	23
Abbildung 2.18 Zellstoff-Faser und Zementfaserplatte als Produkt [10].....	24
Abbildung 2.19 Ablaufdiagramm für die Herstellung von großformatigen Fassadentafeln im "Hatschekverfahren [Quelle: equitone.de].....	24
Abbildung 2.20 Faserzementtafeln: 1) "linea", matte, profilierte Oberfläche; 2) "tectiva" matte, geschliffene Oberfläche [13].....	25
Abbildung 2.21 Faserzementtafeln am Objekt OD, TU Wien.....	25
Abbildung 2.22 Befestigung an die Unterkonstruktion aus Holz [13].....	26
Abbildung 2.23 Verschiedene Muster- und Farbproben von Corian auf hellem Corian-Untergrund [11].....	27
Abbildung 2.24 Leonardo Glass Cube in Bad Driburg [41].....	28
Abbildung 2.25 KEIL Anker [16].....	31
Abbildung 2.26 Befestigung für "DuPont Corian" Platten [16].....	31
Abbildung 2.27 3D – keramischen Kacheln [18].....	32
Abbildung 2.28 Museum der Kulturen, Basel-Wittenauer [43].....	33
Abbildung 2.29 Raumfachwerk aus Stahl (links) und Anschlussdetails (rechts) [43].....	33
Abbildung 2.30 Sichtbare (links) und verdeckte (rechts) Befestigung der Keramikplatten [12].	34
Abbildung 2.31 Glasfaser [Quelle: haasetank.de].....	35

Abbildung 2.32 Vergleich der Materialeigenschaften: spezifisches Gewicht [Quelle: pluessag.ch]	35
Abbildung 2.33 Vergleich der Materialeigenschaften: E-Modul [Quelle: pluessag.ch]	36
Abbildung 2.34 Vergleich der Materialeigenschaften: Zugfestigkeit [Quelle: pluessag.ch]	36
Abbildung 2.35 Vergleich der Materialeigenschaften: Wärmeausdehnungskoeffizient [Quelle: pluessag.ch]	36
Abbildung 2.36 Pultrusionsverfahren [Quelle: pluessag.ch]	37
Abbildung 2.37 Lamilux GFK-Fassadenplatte [Quelle: lamilux.de]	37
Abbildung 2.38 Befestigung der GFK-Fassadenplatten auf eine Unterkonstruktion aus Aluminium [22]	38
Abbildung 2.39 HPL Platte [24]	39
Abbildung 2.40 Montage der HPL-Platte [Quelle: ws-onlineshop.de]	40
Abbildung 2.41 Inhaltsstoffe von WPC: Holz und Kunststoff [Quelle: casando.de]	41
Abbildung 2.42 Herstellung von WPC-Elementen [28]	41
Abbildung 2.43 Fassadenelemente aus WPC [Quelle: woodentec.de]	42
Abbildung 2.44 Unterkonstruktion mit einlagiger Dämmung [29]	43
Abbildung 2.45 Guggenheim Museum in Bilbao (Frank O. Gehry, 1997) [2]	44
Abbildung 2.46 Zusammensetzung von Holzwerkstoffen [Quelle: waldwissen.net]	47
Abbildung 2.47 Einteilung von Holzwerkstoffen [Quelle: waldwissen.net]	48
Abbildung 2.48 Chadston Shopping Centre in Melbourne: Stahl-Glas Überdachung [Quelle: seele.com]	51
Abbildung 2.49 Glasprodukte für Fassaden [2]	53
Abbildung 2.50 Bruchbild des Glases: a) Normalglas; b) TVG; c) ESG [2]	54
Abbildung 2.51 Das Fassadenwerkstoff „Made of Air“ (MOA), Berlin [Quelle: madeofair.com]	55
Abbildung 3.1 Flexible Textilfassade [32]	56
Abbildung 3.2 Gewebe, Spann- und Befestigungstechniken [Quelle: schueco.com]	58
Abbildung 3.3 Luftfilternde textile Fassade [33]	58
Abbildung 3.4 Précontraint®-Technologie [35]	59
Abbildung 3.5 Punktuelle und lineare Befestigung des Gewebes [34]	60
Abbildung 3.6 Tuchhaltertechnik [Quelle: schueco.com]	60
Abbildung 3.7 Detail der Anschlüsse: Glasträger und Lamellen (rechts) und Knotenpunkt zw. Glasträgern [36]	61
Abbildung 3.8 Ergebnisse einer FEM Analyse: Glasträger (links) und Glasscheibe (rechts) [36]	62
Abbildung 4.1 RKM 740 Tower in Düsseldorf (3-D Modell der Fassade) [Quelle: imagine-computation.com]	63
Abbildung 4.2 Modelle der Fassade für das RKM Tower [33]	64
Abbildung 4.3 Überarbeitung der Architektengeometrie [33]	65
Abbildung 4.4 Beispiele von gebogenen Glasfassaden; links: Foundation Louis Vuitton, Paris von Frank Gehry; rechts: Opus, Dubai von Zaha Hadid Architects [Quelle: google.com]	66
Abbildung 4.5 Entwurfsprozess mit parametrischen Oberflächen [37]	66
Abbildung 4.6 Überblick über den Arbeitsablauf für Design-Tool [37]	67
Abbildung 4.7 Herstellung einer doppelt gekrümmten Fläche mit 3x3 kalt gebogenen Platten zur Validation der Ergebnisse [37]	68
Abbildung 5.1 Swatch Gebäude in Biel, Schweiz [Quelle: google.com]	69
Abbildung 5.2 Hautträger (links) und vormontierte Fassadenelemente (rechts) [38]	69
Abbildung 5.3 Verschiedene Fassadenelemente [38]	70
Abbildung 5.4 Referenzmodell der Fassade und Nummerierungssystem [39]	71

Abbildung 5.5 Blattverbindung (links) und Anpassung (rechts) [39] ..... 71  
Abbildung 5.6 Getrennte und integrierte Funktionen [38] ..... 72  
Abbildung 5.7 Integration von TGA und Tragstruktur [38] ..... 72