

BBSR-
Online-Publikation
49/2024

Adaptive Sun Skins

Grundlagen für adaptive und multifunktionale
Solarflächen in urbanen Architekturen

von

Prof. Dr. Timo Carl
Prof. Dr. Markus Schein
Roger Loho
Max Stein

Adaptive Sun Skins

Grundlagen für adaptive und multifunktionale Solarflächen in urbanen Architekturen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.12

Projektlaufzeit: 08.2021 bis 09.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuerin

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Verena Kluth
verena.kluth@bbr.bund.de

Autoren

Frankfurt University of Applied Sciences
Prof. Dr. Timo Carl
timo.carl@fb1.fra-uas.de

Dipl.-Ing. Roger Loho
roger.loho@fb1.fra-uas.de

Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Detmolder Schule für Gestaltung
Prof. Dr. Markus Schein
markus.schein@th-owl.de

Dipl.-Des. Max Stein

Redaktion

Frankfurt University of Applied Sciences
Prof. Dr. Timo Carl

Stand

April 2024

Satz und Layout

Frankfurt University of Applied Sciences
Samuel Gemeinder

Bildnachweis

Titelbild: Timo Carl; Markus Schein
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 92

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Carl, Timo; Schein, Markus; Loho, Roger; Stein, Max, 2024: Adaptive Sun Skins: Grundlagen für adaptive und multifunktionale Solarflächen in urbanen Architekturen. BBSR-Online-Publikation 49/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

	Einleitung	6
	Abstract	9
1.1	Arbeitspaket 1: Ausgangspunkt Geometrierecherche	
1.1.1.	Recherche industrielle Verpackungen - Schwerpunkte tiefgezogene Blister-Verpackungen	10
1.1.2.	Recherche Kofferschalen	11
1.1.3.	Systematisierung Kofferschalen-Typologien	12
1.1.4.	Ergänzende Recherche zu weiteren formgebenden Verarbeitungsverfahren: Faltungen, Wölb-Strukturieren, Stanz-Nibbeln, Pressteile	13
1.1.5.	Ergänzende Recherche Karosseriebauteile	14
1.1.6.	Ergänzende Recherche Technischer Leichtbau im Blechbereich	15
1.1.8.	Stand der Technik Sickenausbildung	16
1.1.8.1.	Recherche Grundlagen Tiefziehen	18
1.1.9.	Überprüfung einiger Ausgangsannahmen zur Entwicklung eines räumlich ausgesteiften Leichtbauträgerelements zur OPV-Integration in Polycarbonat-Verbundbauweise	19
1.1.9.1.	Stand der Technik Kunststoffe im Fassadenbau – Fokus Polycarbonate	23
1.1.9.2.	Recherche Verstreckung beim Thermoformen	26
1.1.10.	Gängige Auflagersituationen von Fassaden- und Dachelementen	27
1.1.11.	Vorgezogen: Grundlegende Erkenntnisse zum Tragverhalten und vereinfachte FEM-Simulation	28
1.1.12.	Bewertung und Synthese der Recherche	30
1.1.13.	Bewertungsmatrix entwurfliche Vorversuche	32
1.1.14.	Ergänzende Studien zur Rapportierung Architekturfassaden – Beispiele	34
1.2.	Arbeitspaket 2: Materialversuche, Systematisierung der Geometrieauswahl und Vorarbeiten	
	Parametrisierung digitales Modell	36
1.2.1.	Vorversuche Bewertung Randausbildung	37
1.2.2.	Tiefzugversuche in Polycarbonat (2 und 4 mm Stärke)	38
1.2.3.	Ergänzender Biegezug-Versuch zur statischen Evaluation	39
1.3.	Arbeitspaket 3: Modellierung und Simulation sowie erweiterte Geometrieversuche	40
1.3.1.	Festlegung Grundlagengeometrie für weitere Bearbeitung	40
1.3.2.	Ergänzender Ansatz für die Simulation nach der linearen Beultheorie	40
1.3.3.	Grundlegende Annahmen für eine vereinfachte und schnelle FEM-Simulation	42
1.3.4.	Materialkennwerte für die statische Simulation	43
1.3.5.	Anwendung der entwickelten Werkzeuge in einer parametrischen Modellierungsumgebung	44
1.3.6.	Ergänzende Umsetzung eines vereinfachten Planungswerkzeugs und Prototypenbau im Rahmen der Ausstellung „MS Wissenschaft“	45
1.3.7.1.	Integration der solaren Simulation in die digitale Prozesskette	47

1.3.7.2.	Teilautomatisierte Geometrierzeugung, solare Simulation und qualitative Bewertung	48
1.3.8.	Geometriebetrachtung im Detailmaßstab	51
1.3.9.	Ausblick: Statische RFEM Detailsimulation	55
1.3.10.	Geometrische Abstraktion	56
1.3.11.	Simulationsaufbau: Auflagerkonfiguration und Ausbildung	56
1.3.12.	Darstellung Ergebnisse der durchgeführten RFEM-Simulationen	57
1.3.13.	Erkenntnisse aus der RFEM-Simulation	59
1.3.14.	Ermittlung der max. Scherkräfte im Verbundlaminat im Zugversuch	59
1.3.15.1.	Versuchsaufbau Zugversuche	60
1.3.15.2.	Ergebnisse Zugversuche	60
1.3.16.	Bewertung der statischen Performanz mittels Schubspannung und Verformung	62
1.3.17.	Digitales Planungstool und Optimierung	63
1.3.17.1.	Funktionsweise Planungstool	63
1.3.17.2.	Optimierung	65
1.3.17.3.	Vergleich Optimierungsvarianten	66
1.4.	Arbeitspaket 4: Abschließende digitale Modellierung und Modellversuche für eine ausgewählte Großform als Demonstrator	68
1.4.1.	Formenbau und thermoplastische Umformung	68
1.4.2.	Laminieren eines Verbundbauteils	69
1.4.3.	Wegezugversuch des Verbundbauteils	71
1.4.5.	Demonstrator auf der Bau München	74
1.4.6.	Erste Abschätzung Life Cycle / CO ₂ -Äquivalente für Sun Skins Trägersystem	77
1.4.7	Potenziale für weitere Materialeinsparungen	80
1.5.	Arbeitspaket 5: Fazit	83
1.5.1.	Fazit	83
2	Ergebnisverwertung	86
3	Mitwirkende und Danksagung	87
4	Anhang	88
4.1.	Literaturverzeichnis	88
4.2.	Abbildungsverzeichnis	91
4.3.	Glossar	101

Einleitung

Im Forschungsprojekt ‚Adaptive Sun Skins‘ wurden in den letzten beiden Jahren erfolgreich instrumentelle, methodische und technologische Grundlagen für dünne 3D-Polycarbonat-Trägersysteme zur Integration von organischer Photovoltaik (OPV) im Leichtbau entwickelt. Damit kann die OPV-Technologie für nachhaltige, anspruchsvoll gestaltbare multifunktionale Fassadenpaneele zur Energiegewinnung und Verschattung für die Gebäudefassade erschlossen werden.

Seit der Bewilligung dieses Projektes im April 2021 hat sich die Situation im Bereich der solaren Energieerzeugung deutlich verändert, nicht zuletzt durch politische Interventionen der Bundesregierung. Die Novelle des EEG vom Januar 2023 hebt die Zielmarke des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland für 2030 auf 80 %. Die Photovoltaik soll bis dahin auf 215 Gigawatt Leistung ausgebaut sein (Bundesregierung, 2023). Das jährliche Ausbauziel von derzeit neun Gigawatt soll ab dem Jahr 2026 auf 22 Gigawatt steigen. Dies ist auch nur dann ausreichend, wenn andere nachhaltige Energieträger, Netzausbau oder Speicherkapazitäten ihre Ausbauziele erreichen. Der drastische Einbruch des Photovoltaik-Zubaus 2013 durch die Reduzierung der Einspeisevergütung (Zeit, 2023) oder die politische Diskussion um Klima- und Umweltschutzmaßnahmen sind weitere Beispiele, die anregen, verstärkt an der gesellschaftlichen Akzeptanz der Photovoltaik – besonders für den urbanen Raum – zu arbeiten.

Stand Ende 2022 waren rund 32.000 Hektar Freiflächenphotovoltaik gebaut, was einen Anteil von 0,07 Prozent an der landwirtschaftlich genutzten Fläche Deutschlands ausmacht (Umweltbundesamt, 2023). Die Erschließung von weiteren Flächenpotentialen im urbanen Räumen für die gebäudeintegrierte Photovoltaik (GiPV) hilft die Effekte der Flächenkonkurrenz weiter zu verringern, da neben Landwirtschaft und Energieerzeugung noch andere Bereiche wie etwa Siedlungs- und Gewerbebau oder der Naturschutz umfangreichen Bedarf haben.

Damit rückt eine Betrachtung der ästhetischen und funktionalen Perspektiven für den Einsatz urbaner Photovoltaik in den Fokus. Dieses Forschungsprojekt basiert deswegen auf der Technologie der organischen Photovoltaik (OPV), die im Vergleich zu monokristalliner, siliziumbasierter Photovoltaik (PV) deutlich geringere Werte an CO₂-Äquivalenten pro erzeugter Kilowattstunde aufweist: 3 bis 15 g CO₂e pro kWh bei 20 Jahren Lebensdauer (Müller und Kube, 2020) zu 43 g bis 63 g CO₂e/kWh bei 30 Jahren Lebensdauer (Umweltbundesamt, 2023). Dazu kommt ein für die ästhetische Betrachtung wesentliches Kriterium. Dank ihrer geringen Stärke, Transparenz und Flexibilität weist die OPV ausgezeichnete Möglichkeiten für eine hochwertige Gestaltbarkeit auf, wodurch sich die Technologie für eine architektonische anspruchsvolle Gebäudeintegration besonders eignet, da sie an unterschiedliche Einbausituationen geometrisch und gestalterisch mithilfe digitaler Planungstools angepasst werden kann. Die für dieses Projekt eingangs festgestellte Forschungslücke betrifft die industrielle Erforschung eines leichten Trägersystems, das die gestalterischen, ökologischen und funktionalen Vorteile der OPV-Technologie bei einer Gebäudeintegration ausnutzt. Neben der solaren Energieerzeugung spielt beim Einsatz im urbanen Raum die architektonische Gestaltung unserer Lebenswelt eine ebenso wichtige Rolle.

Für die Entwicklung wurden Materialkennwerte und Fertigungsprozesse durch die prototypische Entwicklung eines solchen Trägersystems erforscht, um ein digitales Planungswerkzeug zu informieren. Letzteres bildet die komplexen Randbedingungen (Ausrichtung zur Sonne, Statik, unterschiedliche Einbausituationen, geometrische und materialspezifische Bedingungen) im Entwurfsprozess ab. Dieses digitale Tool unterstützt die Planer:innen im Bauwesen bei ihrer Arbeit.

Das erforschte Trägersystem ist ein Verbund auf Basis räumlicher, im Thermo-Forming-Verfahren umgeformter, transparenter und dünner Polycarbonatfolien (1–2 mm), die durch Ihre räumliche Aussteifung eine erheblich reduzierte Materialstärke, im Vergleich zu einer ebenen Geometrie benötigen.

Der hier gezeigte Sun Skins Demonstrator benötigt zum Beispiel nur zwei Lagen an 2 mm Polycarbonatfolie für den Einsatzbereich der GiPV mit realistischen Kraftannahmen (Abb. 1).

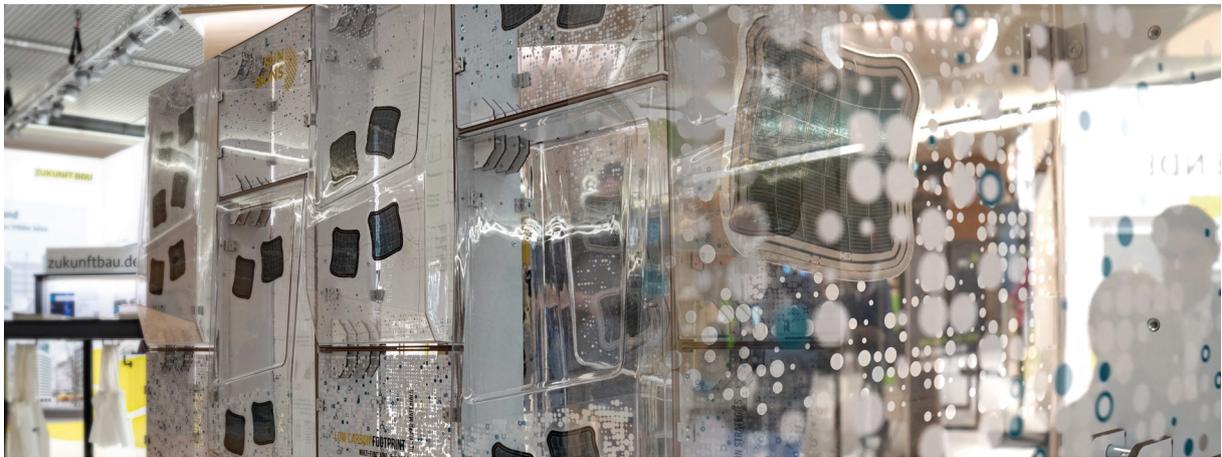


Abb. 1: Entwickeltes OPV-Trägersystem, beispielhaft für eine Pfosten-Riegelfassade realisiert, auf dem Zukunft Bau Stand bei der Bau München 2023.

Der grundsätzliche Aufbau sieht eine statisch wirksame Tragschicht aus Polycarbonat vor, sowie eine dünnere Deckschicht, die der Klimakapselung der OPV-Module dient. Zwischen diesen beiden räumlich ausgeformten Polycarbonat-Schichten liegt eine Lage OPV-Module, die ihrerseits durch zwei weitere Lagen Thermoplastisches Polyurethan (TPU) zu einer stabilen und witterungsgeschützten Sandwich-Konstruktion verbunden wird. Polycarbonat ist ein im Fassadenbau bewährtes, UV-stabilisierbares Material, das zudem schlagfest ist und sich gut bedrucken lässt. Letzteres erlaubt das Aufbringen von Mustern. Darüber wird der Lichtdurchgang einer Fassade lokal steuerbar und Lichtwirkung, Blendschutz und passive Verschattung können differenziert ausgebildet und mit der Energieproduktion verbunden werden.

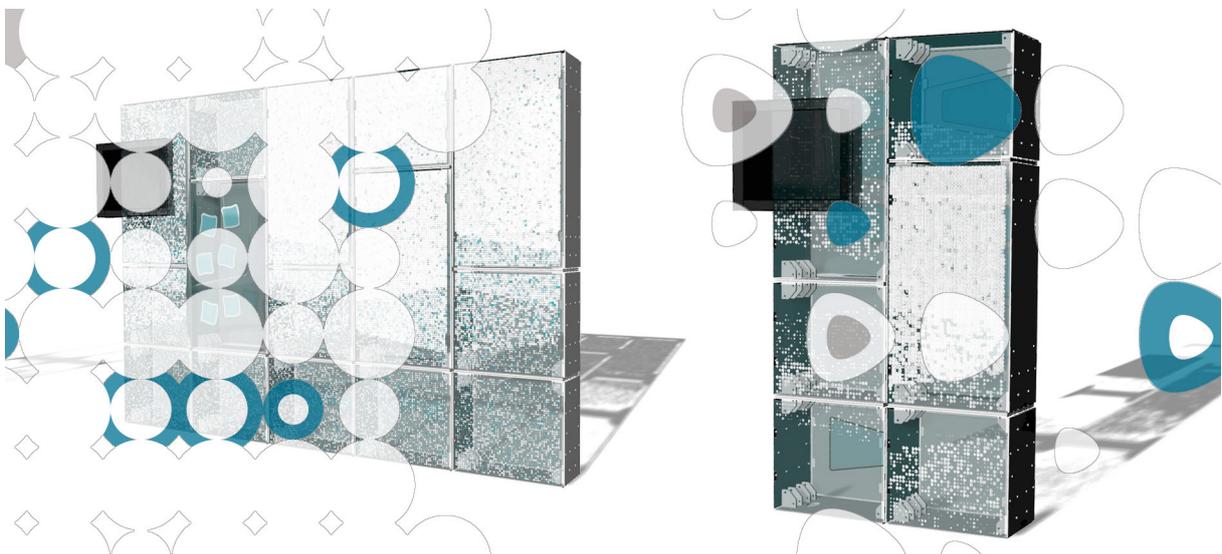


Abb. 2: Digitale Darstellung der Innenseite des Demonstrators auf der Bau München, die die Gestaltbarkeit des Systems durch aufgedruckte Muster in verschiedenen Formen und Skalierungen illustriert.

Die parallel zum Entwurf des Trägersystems und den Materialtests entstandene digitale Methodik erlaubt das Zusammenwirken parametrischer Modellierung, solarer Strahlungsanalyse, vereinfachter statischer Simulation, und bildet die Grundlage für eine detaillierte statische Betrachtung.

Das parametrische Modell repräsentiert dabei die geometrischen Randbedingungen, die sich aus Material und Fertigung ergeben. Somit entsteht ein Möglichkeitsraum für den Entwurf von OPV-Trägermodulen, der geometrische und andere qualitative Entwurfsparameter beinhaltet. Mithilfe des digitalen Werkzeugs kann die Aggregation der Sun Skins Paneele auf unterschiedlichen Gebäude bzw. Fassadenformen effizient getestet und geometrisch optimiert werden.

Solare Strahlungsanalyse und eine vereinfachte statische FEM (Finite Elemente Methode) Simulation erlauben es, ein Trägerpaneel lokal für Lastenbeiträge und die Einstrahl-Bedingungen der Sonne anzupassen oder multimodal über eine Pareto-Optimierung den solaren Ertrag und das Gewicht zu verbessern. Eine detaillierte Finite-Elemente-Analyse verifiziert die entwickelten Formen der Trägermodule und gibt wesentliche Hinweise für eine differenziertere Optimierung von Form und Materialstärke, z.B. durch die Ausbildung zusätzlicher, versteifender Sicken.

Der hier vorliegende Bericht beschreibt die Forschungsergebnisse anhand von physischem Trägersystemen (Demonstratoren) und digitaler Modellierung, bewertet die entwickelten Ergebnisse und gefundenen Erkenntnisse und gibt einen Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf.

Ein ganz herzlicher Dank gilt allen Beteiligten für ihre intensive und konstruktive Mitarbeit an dem Adaptive Sun Skins Projekt.

Abstract

Within the past two years, the research team of the “Adaptive Sun Skins” project has successfully developed tools, methods and technological foundations for lightweight solar carrier systems for the building integration of Organic Photovoltaic (OPV) modules. This research aids the design and fabrication of sustainable, multifunctional and high-grade architectural façade components.

Since the project began in early 2021, the field of solar energy production in Germany has changed. On the one hand, the improvement in political constraints for the installation of novel photovoltaic capacities is notable, whereas the interplay between food and energy production persists, but has not yet resulted in significant conflicts. On the other hand, instances such as the significant decrease in installed photovoltaic capacities in 2013, owing to a modification in the legal framework for energy pricing, or political discourse on climate issues consistently underscore the necessity to exert efforts towards enhancing the acceptance of photovoltaic energy.

Therefore, increasing sustainable energy production, which includes the areas in the urban realm, will hinge on the successful implementation of PV technology into buildings. This requires consideration of not only ecological, but also social and aesthetic factors. Any integration of organic photovoltaics (OPV) into buildings must uphold the aesthetic, ecological, and functional advantages of the technology.

Presently, there exists no OPV-carrier system that meets these objectives. Given this research gap, we decided to develop a prototype system, together with a digital tool set that allows architects, engineers, and designers to negotiate the complex constraints and solution spaces of such a lightweight OPV-carrier system.

The Polycarbonate-OPV-carrier system developed by our team is a sandwich construction that utilizes thermoformed, three-dimensional polycarbonate foils, resulting in a material impact reduction of approximately one third compared to flat sheets, among other advantages.

An open, highly accessible, and variable digital tool set, exemplifying the developed design methodology, comprises a parametric geometry model that simultaneously represents design space and geometrical constraints of material and production. Furthermore, this digital tool set includes an automated Pareto optimization for the global geometry of various carrier geometries, including near-real-time solar radiation and simplified structural analysis. An additional level of structural simulation for ribbing, conducted through sophisticated finite element analysis, completes and informs the digital tool set. Furthermore, material and fabrication tests have been conducted successfully and implemented into a bespoke digital tool.

The subsequent report demonstrates the simultaneous design of the physical demonstrator and computational model, highlights significant findings, and provides a comprehensive assessment of the potential of the Adaptive Sun Skins approach and the necessity for further investigation.

Many thanks to all those involved for their constructive and intensive collaboration on the “Adaptive Sun Skins” project.

1 Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Ausgangspunkt Geometriecherche

Zum Projektstart wurden ausführliche, breit angelegte Vorrecherchen zu räumlichen Aussteifungsprinzipien aus den Bereichen Natur und Technik durchgeführt. Die potentielle Übertragbarkeit der gefundenen Prinzipien auf die Realisierung dünner, durch thermoplastische Umformung hergestellte Trägerelemente für organische Solarzellen wurde evaluiert und hinsichtlich der folgenden Kriterien bewertet:

- Eignung für eine präzise thermoplastische Umformung
- Statische Leistungsfähigkeit
- Aufnahme von organischen Photovoltaikmodulen (OPV¹)
- Eignung für einen gestalterischen Rapport/ästhetisches Erscheinungsbild

Zielsetzung dieses Arbeitspaketes ist einerseits den Stand der Technik im Bereich räumlicher Aussteifung dünner Bauteile zu skizzieren und andererseits ästhetische Inspirationen zu finden, die über Detaillierung und Rapportierung von Trägerpanelen den weiteren Verlauf des Projektes informieren können.

Hier folgt ein zusammenfassender, beispielhafter Überblick über die vorgenommenen Recherchen.

1.1.1. Recherche industrielle Verpackungen - Schwerpunkte tiefgezogene Blister-Verpackungen

In industriellen Thermoform-Produktionsverfahren werden Plastikfolien mit sehr geringen Materialstärken zu Verpackungsprodukten mit mittlerem bis hohem Detaillierungsgrad von hoher Steifigkeit thermoplastisch umgeformt (Abb. 3). Alle genannten Aspekte sind direkt relevant für das im Projekt zu entwickelnde und zu untersuchende Trägermodul aus Polycarbonat-Folien.



Abb. 3: Dünne Folien tiefgezogen als Verpackungsmaterial für z. B. Lebensmittel.

(1) Organic Photovoltaic, organische Photovoltaik beschreibt Photovoltaik-Zellen, die im Gegensatz zu den meistverbreiteten Photovoltaik-Zellen nicht auf Silizium, sondern kohlestoffartigen Verbindungen basieren.

Als Teilmenge alternativer Herstellungsprozesse – Formpressen und Spritzgießen – wurden zusätzlich Verpackungen aus zellulosebasierten Materialien recherchiert (Abb. 4).



Abb. 4: (von links nach rechts) Holzschliffschale, kompostierbare Schale aus Pulp, Spritzgussteile auf Zellulose-Basis.

Insgesamt wird aus der Vorrecherche bereits deutlich erkennbar, dass die Stabilisierung eines Bauteils vereinfacht betrachtet aus einer Kombination von Schalenwirkung und einer räumlicher Versteifung entsteht, die entweder als Sicke oder als Kante ausgebildet ist. Die Geometriedetaillierung ist von weiteren produktionsbedingten oder funktionalen Anforderungen abhängig, wie zum Beispiel die Ergonomie oder Stapelbarkeit der Einzelteile.

1.1.2. Recherche Kofferschalen

Kofferschalen (Abb. 5) verhalten sich in ihrem Tragverhalten ähnlich zu den untersuchten Verpackungen. Sie werden in Tiefzug-, Spritzguss- oder Form-Pressverfahren hergestellt (Abb. 6). Sie sind näher am Forschungsgegenstand als die unter 1.1.1. untersuchten Verpackungen, da sie höhere Lasten eintragen können, langlebig sein müssen und sich auch in ihrer Größe einem Fassaden- oder Dachelement annähern.

Zusätzlich spielen ästhetische Erwägungen eine deutlich größere Rolle. Wesentliche Gestaltungsmerkmale sind Farbgebung und Ornamentierung. Die Materialgruppe der Polycarbonate, wie sie für das zu entwickelnde Trägersystem zum Einsatz kommen, entsprechen dem Stand der Technik.



Abb. 5: Kofferschalen der Marke Samsonite, in unterschiedlichen Gestaltungsformen

An den Kofferschalen ist deutlich sichtbar, wie Schalenprinzipien und zusätzliche räumliche Aussteifungen im Detail als statisches System zusammenwirken (Abb. 6 [mitte,rechts]). Gleichzeitig überlagern sich ästhetische und statisch notwendige Geometriemerkmale. Um für das adaptive Trägermodul eine differenziertere Bewertung und Entwicklung von Formen vornehmen zu können, wurde im weiteren Verlauf die Versteifung planarer Bauteile durch Sicken recherchiert und als Gestaltungshilfe in Form einer Checkliste Sicken abgebildet.



Abb. 6: (links) Herstellung einer Kofferschale aus Kunststofffolie. (mittig, rechts) Details zur Gestaltung und Aussteifung von Koffern.

Im Schalendesign von Koffern lassen sich verschiedene Typen identifizieren, etwa als Ganzes geformte Schalen (Abb. 7 [links]), Schalen, die aus Einzelteilen gebildet werden (Abb. 7 [mittig]) oder solche, die zusätzliche Verstärkungselemente enthalten (Abb. 7 [rechts]).



Abb. 7: Unterschiedliche Typen von Kofferschalen; (links) Schale mit Sicken zur Aussteifung, (mittig) Schale mit Aussteifungsrippen, (rechts) Schale aus Segmenten mit aussteifenden Alu-Schienen.

1.1.3. Systematisierung Kofferschalen-Typologien

Innerhalb der untersuchten Reisekoffer lassen sich unterschiedliche Typen hinsichtlich ihrer geometrischen Systematik finden. Dies betrifft die Begrenzung aussteifender, integrierter Elemente, die Richtung dieser Elemente und den Umgang mit additiven, auf die Kofferschale aufgebrachter Detailelemente. Die folgende Abbildung (Abb. 8) veranschaulicht diese verschiedenen Typen und ihre Mischformen.

Eine direkte Übertragbarkeit der Kofferschalentypen auf architektonische Trägerelemente ist nicht möglich, da die Situation des Lastabtrags innerhalb eines Koffers – Kräfte werden durch einen Ring zwischen den beiden Schalen aufgenommen und verteilt – und die Standard-Auflagertypen von Fassaden- oder Dachelemente verschieden sind.

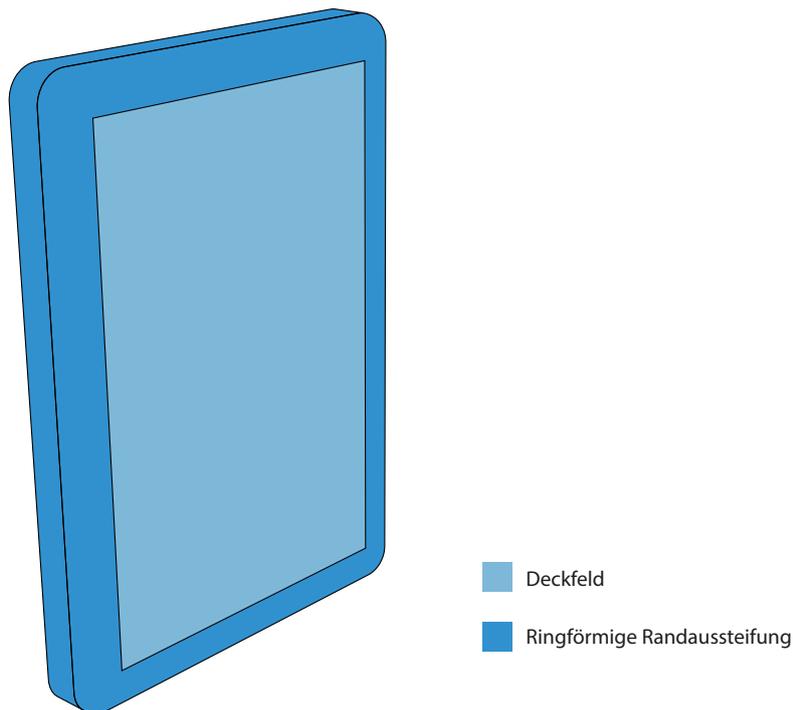


Abb. 8: Darstellung der verschiedenen Zonen einer Kofferschale.

1.1.4. Ergänzende Recherche zu weiteren formgebenden Verarbeitungsverfahren: Faltungen, Wölb-Strukturieren, Stanz-Nibbeln, Pressteile

Als weitere Möglichkeiten dünne, flächige Materialien geometrisch auszusteiern, wurden einige Beispiele aus der Blechverarbeitung untersucht: Mustergewölbte, gewalzte und stanz-genibbelte Folienbauteile² (Abb. 9).

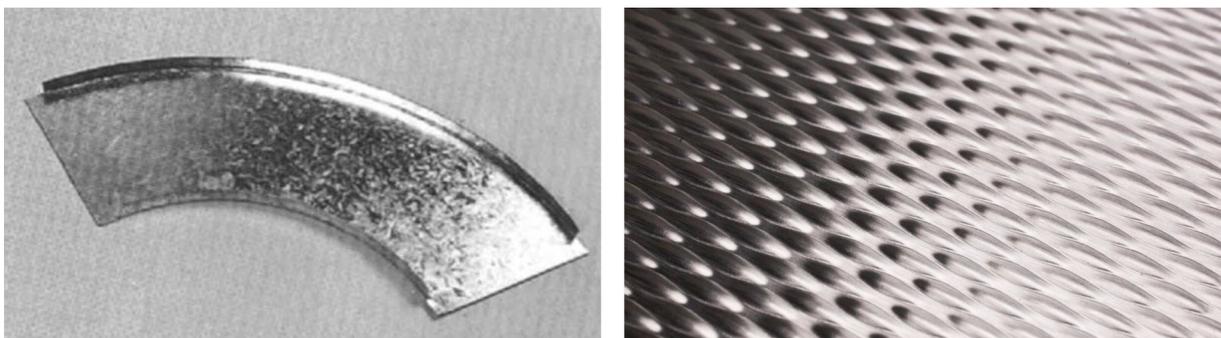


Abb. 9: (links) gefaltetes/ gebördeltes Blech, (rechts) Blech mit Wölb-Struktur vollflächig.

Faltung: Die Faltung von Blechen ist durch die Fertigung beschränkt, bezüglich der Geometriefindung für dieses Projekt jedoch relevant.

Wölb-Strukturieren: Die Integration von einfach biegbaren OPV Modulen in zweiseitig gewölbten Strukturen ist aufgrund der dreidimensionalen Krümmung solcher Flächen nicht möglich.

(2)
Der Begriff „Folie“ wird für dünne, in der Flächenausdehnung deutlich größere Metall- oder Kunststoffhalbzeuge benutzt (vgl. Knippers 2010, S. 94).



Abb. 10: (links & mittig) verschiedene Blech-Bauteile mit unterschiedlich ausgeprägten Stanz-Nibbeln, (rechts) Pressteil aus Blech mit zugehöriger Pressform

Stanz-Nibbeln: Die Verwendung von Stanz-Nibbeln wäre in Teilbereichen, wie z.B. Kabelaufnahmen möglich, jedoch nicht auf den großen Flächen der Geometrien, da die Stanzungen zu kleine Segmentierungen darstellen (Abb. 10 [links, mittig]).

Pressteile: Die Erkenntnisse aus der Fertigung und Planung von Pressteilen konnte teilweise auf die Planung der späteren Geometrien angewendet werden, da die Fertigungstechnik dem Thermoformen ähnlich ist und die Einschränkungen bezogen auf die Formgebung (z.B. keine Unterschnitte, Grensradien) vergleichbar sind (Abb. 10 [rechts]).

1.1.5. Ergänzende Recherche Karosseriebauteile

Karosseriebauteile werden ebenfalls aus dünnen, flächigen Materialien (Blechen) realisiert. Ein möglichst geringes Gewicht wird bei komplexen Lastfällen durch Schalenwirkungen, Queraussteifungen, topologischer Optimierung, Sicken, Hohlkammerprofile und Ähnliches bewältigt. Unterschieden wird hier zwischen einlagigen Bauteilen (z.B. Abb. 11 Kotflügel [links]) und Bauteilen, die aus mehreren Lagen für eine nochmals erhöhte Stabilität zusammengesetzt werden (z.B. Abb. 11 Türelement [rechts]).



Abb. 11: (links) Kotflügel links vorn; (rechts) Karosserie Blech

1.1.6. Ergänzende Recherche Technischer Leichtbau im Blechbereich

In den bisher beschriebenen Recherchen zur Aussteifung dünner Bauteile durch räumliche Aussteifung – Punkte 1.1.1. bis 1.1.5. – tauchen in Variationen und Kombinationen typische Elemente aus dem Metallleichtbau auf: Sicken, Bördelflansch (Bord), Abkantungen, Wölbungen und Spiegel (Abb. 12).

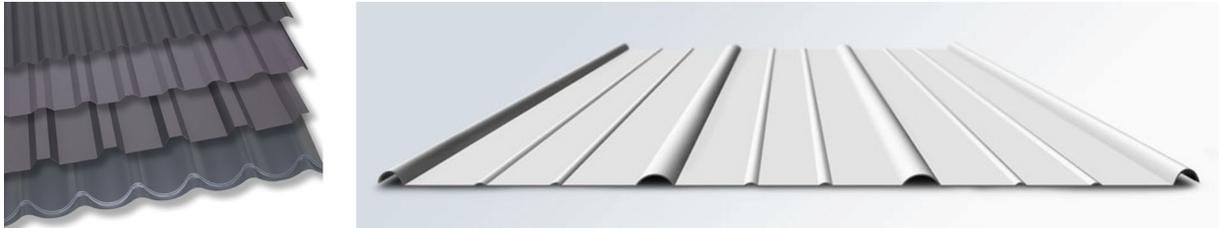


Abb. 12: Unterschiedliche Ausführungen von Strukturblechen

Insbesondere Sicken und Bördeln bzw. Abkantungen aus dem Blechbereich sind Elemente, die sich gut auf die Herstellung von Kunststoffformteilen übertragen und an die Auflager- und Befestigungssituationen im Fassaden- und Überdachungsbereich adaptieren lassen. Des Weiteren können diese Versteifungen so ausgebildet werden, dass die geometrischen Anforderungen von OPV Modul und solare Ausrichtung als auch die Ausformung des tiefgezogenen Trägermoduls erfüllt werden können.

1.1.7. Ergänzende Recherche Falten als Form- und musterbildende Technik

Als mögliche ästhetische Inspiration und auch als weitere Beispiele für räumliche Formen aus flachem Ausgangsmaterial wurde eine Recherche zum Thema Faltungen durchgeführt. Besonders relevant sind dabei die stark aussteifenden, sickenähnlich wirkenden gekrümmten Faltungen (Abb. 13). Durch die einfache und doppelte Krümmung der Geometrie wird eine Biegebeanspruchung des Bauteils deutlich vermindert und Membrankräfte aktiviert (Carl, Weiland 2022).

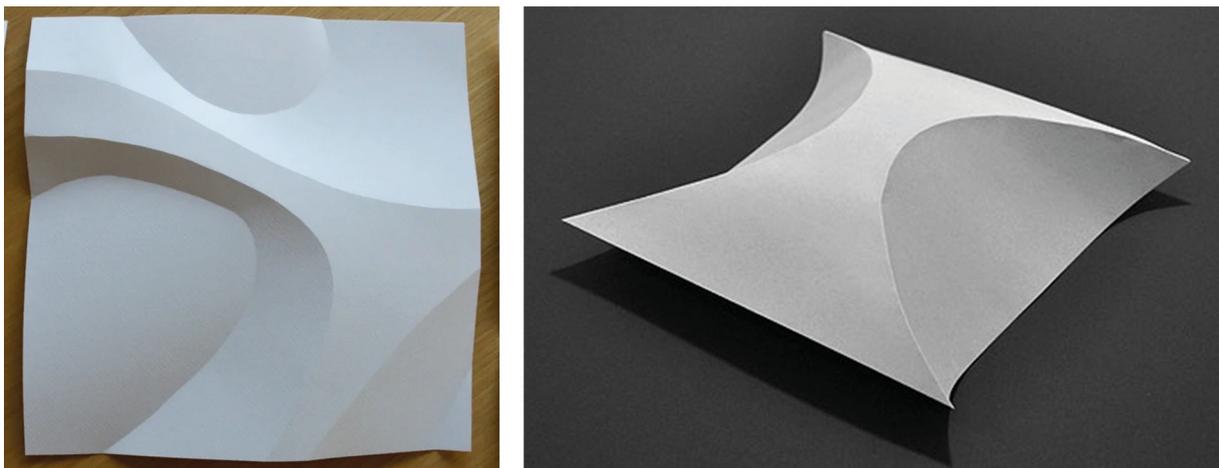


Abb. 13: Unterschiedliche Ausführungen von Strukturblechen

1.1.8. Stand der Technik Sickenausbildung

Anhand einer Literaturrecherche zur Sickenausbildung wurden relevante Aspekte wie die Ausrichtung der Winkel und Sickenhöhen für eine effiziente Versteifungswirkung ermittelt. Es ist wichtig, bei der Anordnung von Sicken widerstandsschwache, geradlinige Achsen zu vermeiden, um ein Durchknicken der Struktur zu verhindern. Sicken sind nur dort einzubringen, wo sie notwendig sind, da sie unter bestimmten Umständen auch eine strukturschwächende Wirkung haben können. Relevante Parameter der Sickenlehre (Oehler, 1966) wurden gesammelt und evaluiert. Daraus wurde eine Checkliste mit positiven und negativen Auswirkungen relevanter Parameter der Sickenbildung, als Hilfestellung für die Gestaltung von dünnen Trägermodul-Geometrien erstellt.

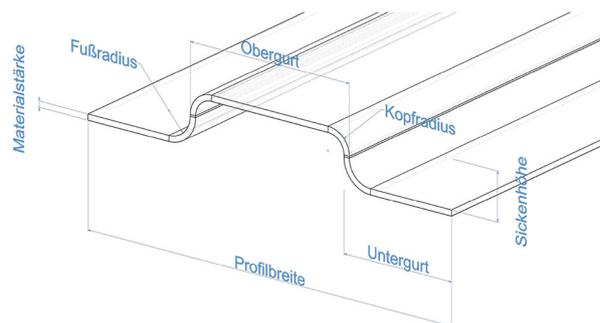
Eine qualitative Übertragbarkeit der Theorien und Handlungsanweisungen aus der Sickenlehre für die Verformung von dünnen Feinblechen bis zu 3 mm auf tiefgezogene, dünnwandige Kunststoffformteile ist grundsätzlich gegeben (Oehler, Weber, 1972).

Regeln und Grundsätze

Auf Basis der genannten Quellen und ausgedehnter Recherche in den Bereichen Maschinenbau, Produktentwicklung, Verpackungsindustrie und Architektur, lassen sich für unser Vorhaben die folgenden Empfehlungen und Regeln zur Gestaltung dreidimensional ausgesteifter Bauteile ableiten. Diese sind in der folgenden Übersicht zusammengefasst (Abb. 14):

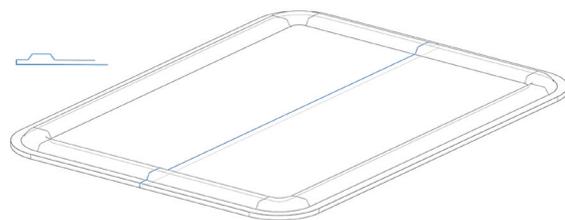
Steifigkeitsbestimmende Parameter

- Länge der Sicke
- Breite der Sicke
- Höhe der Sicke
- Lage der Sicke
- Form der Sicke
- Verlauf der Sicke
- Anordnung von verschiedenen Sicken zueinander



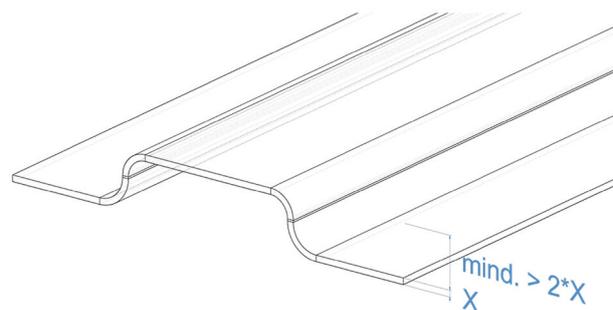
Sickenquerschnitt/ Form der Sicke

- (+) Kreisförmiger / ovaler Sickenquerschnitt
- (+) Trapezförmiger Sickenquerschnitt
- (-) Dreieckiger Sickenquerschnitt
- (-) Rechteckiger Sickenquerschnitt
- (!) Freiform-Sickenquerschnitt



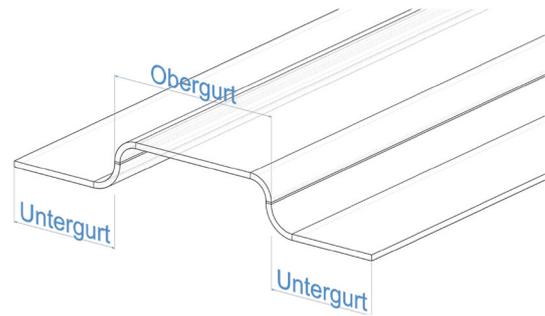
Höhe der Sicke

- (+) Sickenhöhe mindestens $> 2x$ Materialstärke
- (-) Sickenhöhe unter doppelter Materialstärke hat kaum Versteifungswirkung
- (!) Sickenhöhe wichtigster Einfluss auf die Versteifungswirkung



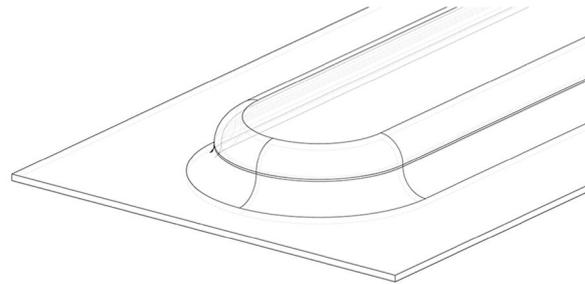
Breite der Sicke

- (+) Steifigkeit am besten, wenn die Summen der oberen und unteren Gurtbreiten gleich groß sind, Versickungsgrad $\psi \approx 1$
- (+) Obergurt \approx die halbe Länge der Profilbreite
- (--) Zu geringe Abstände der Flächenanteile zwischen den Sicken kann negative Auswirkungen auf die Steifigkeit haben



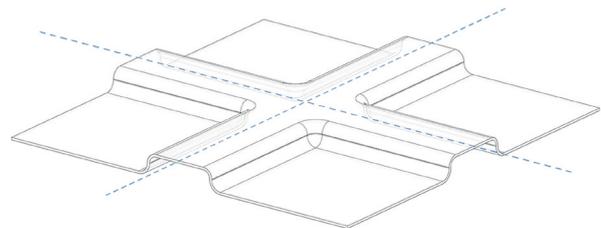
Sickenausläufe

- (+) In Fläche einlaufend
- (+) In Randsicke einlaufend
- (--) Keine unversteiften Randbereiche
- (+) Erhöhte Steifigkeit, wenn Sicken über vorhandene Kanten hinweglaufen



Sickenachsen

- (--) Lange geradlinige Sickenachsen vermeiden
- (+) Geradlinige Sicken kurz ausführen
- (+) Gekrümmter/ runder Sickenverlauf = gute Aussteifung auf X & Y-Achse
- (!) Zur Versteifung z.B. kurze Quersicken in zweite Richtung
- (--) Bei eingepprägten Sicken Knotenpunkte sich kreuzender Sicken vermeiden
- (+) Anordnung der Sicke in Belastungsrichtung erhöht die Knickstabilität



Sickenbild/ Versickungsgrad

- (!) Ein gedachter Schnitt durch ein versicktes Blech muss immer mindestens eine Sicke schneiden.
- (--) Im Optimalfall sollte es nicht möglich sein, dass in das Sickenbild Geraden hineingelegt werden können, die keine Sicke schneiden, denn im Verlaufe dieser Geraden wäre das Material ohne zusätzliche Aussteifung.
- (--) Kreuzungen von Diagonal-Sicken sind zu vermeiden, da sie unter Umständen die Steifigkeit herabsetzen und in den Knotenpunkten Spannungsspitzen entstehen.
- (+) Je ungleichmäßiger eine Sicke verläuft, desto höher ist die Versteifungswirkung.
- (+) Bleche mit Rechteckumfang sollten mit rund verlaufenden Sicken versehen werden.
- (!) Symmetrielinien beachten, damit keine Schwächungen im Sickenbild entstehen.
- (!) Sowohl homogene als auch inhomogene Sickenbilder möglich

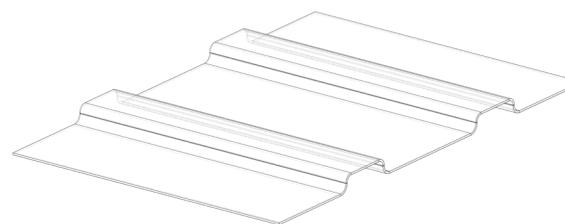
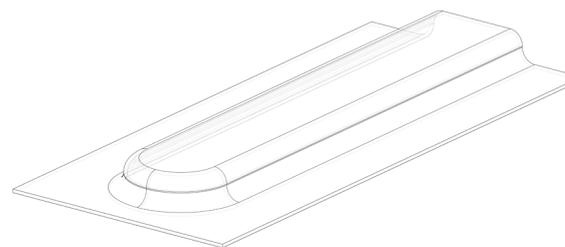


Abb. 14: Sicken-Checklist mit Detailabbildung

1.1.8.1. Recherche Grundlagen Tiefziehen

Das thermoplastische Umformen (umgangssprachlich Tiefziehen) ist ein Prozess, bei dem thermoplastische (durch Wärmeeintrag formbare) Werkstoffe³ durch Erwärmen und Druck (Vakuum) mithilfe einer Negativform umgeformt werden (Abb. 15). Dazu wird im Regelfall der thermoplastische Stoff über die Negativform (Werkzeug) der gewünschten Form gestülpt und durch Erzeugen eines Vakuums die Luft zwischen dem noch warmen Material und dem Werkzeug entzogen. In der industriellen Produktion kann eine hohe Abbildungsgenauigkeit und geringe Stückkosten in der Serienfertigung erreicht werden. Diese ist jedoch von verschiedenen Parametern, wie der idealen Temperatur, der richtigen Werkzeuggeometrie, die das Absaugen der Luft erlaubt, sowie genereller Formeigenschaft wie Verrundungen und Knickradien abhängig. Nach dem erfolgten Umformungsprozess wird das umgeformte thermoplastische Material abgekühlt und kann nach kurzer Zeit ausgeformt, d.h. vom Werkzeug entfernt werden. Für das Tiefziehen von Polycarbonat (PC) liegt der thermoplastische Temperaturbereich bei ca. 180 – 200 °C (Engelsmann, Spalding, Peters, 2010).

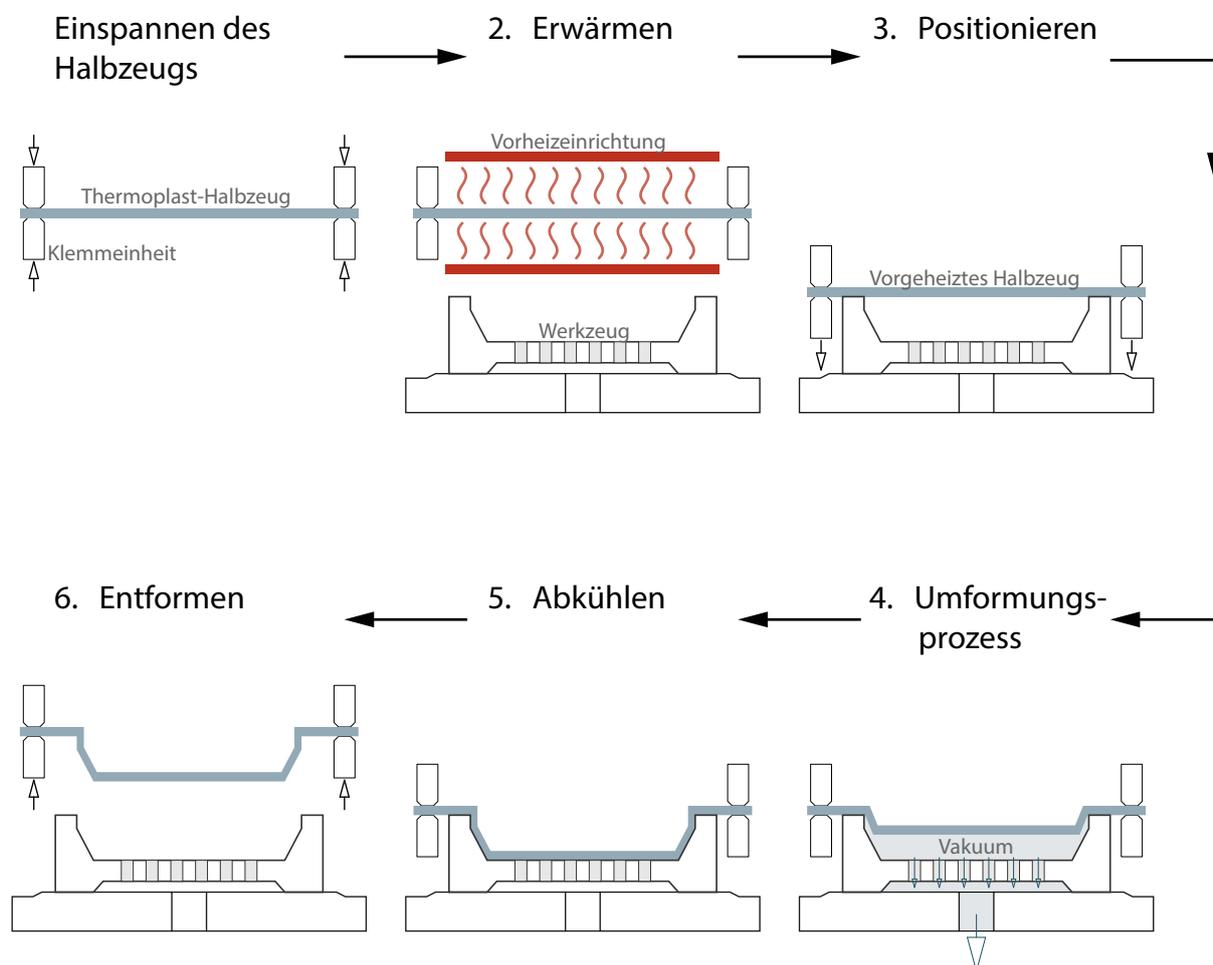


Abb. 15: Schematische Darstellung des Tiefzugprozesses. Zeichnung nach „Fundamentals of Thermoforming“ (Klein, 2009)

(3)
Kunststoffe, die sich in einem bestimmten Temperaturbereich (thermoplastisch) verformen lassen.

1.1.9. Überprüfung einiger Ausgangsannahmen zur Entwicklung eines räumlich ausgesteiften Leichtbauträgerelements zur OPV-Integration in Polycarbonat-Verbundbauweise

Die Recherchen von Herstellungsgrundlagen, Materialeigenschaften, Geometriebeispielen und Strategien zur räumlichen Aussteifung aus verwandten Gebieten bestätigt die Ausgangshypothese bezüglich der notwendigen Entwicklungs- und Verfahrensschritte für ein PC-OPV-PC Sandwich-Bauteil im Wesentlichen.

Grundsätzlich ist die Tiefziehform für die beiden Polycarbonat-Schalen des Sandwiches immer von Innen anzulegen, da die Ungenauigkeiten durch Verstreckung und Materialanhäufung auf der formabgewandten Seite kumulieren (Abb. 16).

Von den zwei Schichten Polycarbonat wird zur Materialersparnis eine als Tragelement mit höherer Materialstärke ausgebildet. Die zweite Lage Polycarbonat dient als Deckschicht zur Kapselung und Integration der OPV. Die dickere Polycarbonat-Folie fungiert als Basislayer, der den Lastabtrag übernimmt. Dadurch kann das benötigte Material zusätzlich reduziert werden. Eine Verbundtragwirkung und Ausgleich von Spannungen durch zwei gleich starke PC-Folien (wie man sie aus dem Glasbau von planaren Bauteilen kennt) wäre nur bei einer symmetrischen Anordnung bei planaren Bauteilen gegeben.

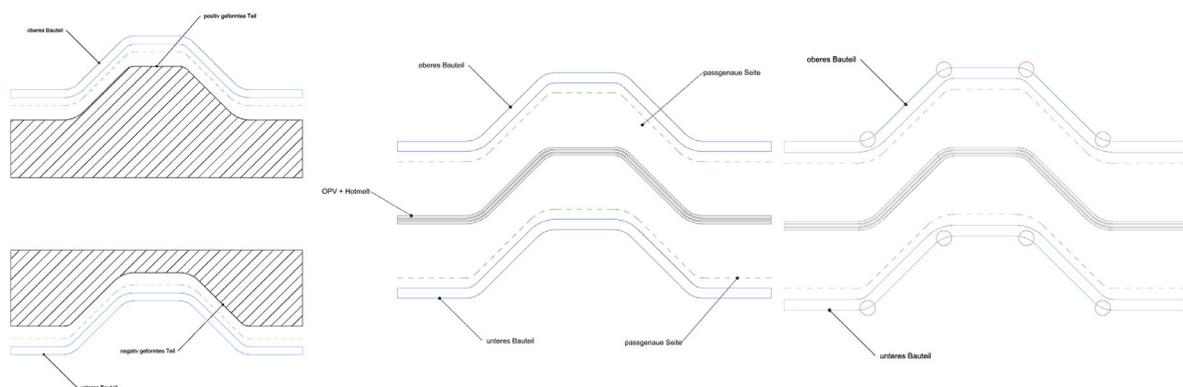


Abb. 16: (links) Passgenaue Werkstück-Seiten beim Tiefzug; (mittig) Zonen der Verformung; (rechts) Planaufbau

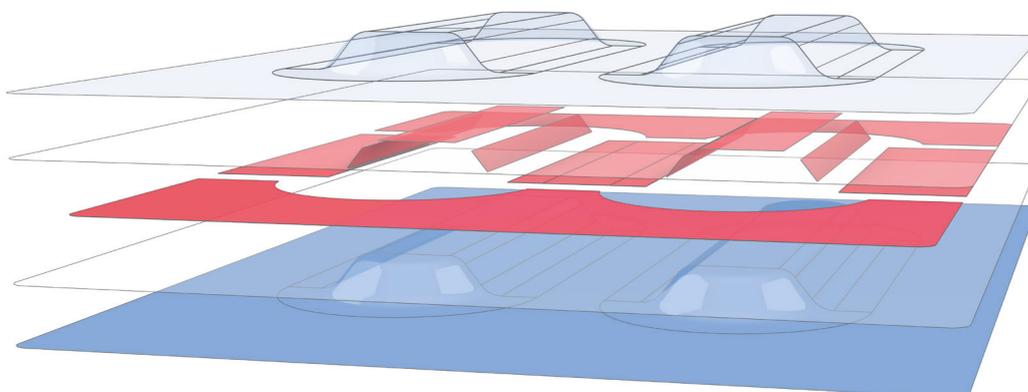
Um die beiden Bauteile und OPV miteinander zu einem integrierten Systembauteil zu verbinden, können Verfahren aus der Glaslamination zur Herstellung überwiegend planarer Bauteile adaptiert werden (Abb. 34, 35). Beim Laminieren entsteht ein Klebeverbund zwischen zwei oder mehr Bauteilen mittels einer Lage Hotmelt⁴. Diese besteht entweder aus EVA-Folien (Copolymer Ethylen-Vinylacetat) oder aus thermoplastischen Polyurethanen (TPUs)⁵. Durch Erhitzen auf ca. 120 °C wird das Hotmelt viskos und verklebt die festen Komponenten des Bauteils miteinander. Dieser Vorgang findet im Autoklav⁶ statt, welcher unter Vakuum das Material über den Zeitraum von mehreren Stunden erhitzt und abkühlt.

(4) Hotmelt, engl. für Schmelzklebstoff. Klebstoffe, die durch Erhitzen „schmelzen“, zähflüssig werden.

(5) Bei TPU handelt es sich um einen Heißschmelzklebstoff, welcher nach der Abkühlung wieder aushärtet und eine Verbindung zwischen den Schichten schafft. Somit gehört TPU zu den nicht reaktiven Klebstoffen (Knippers et al., 2010).

(6) Im Autoklav können Materialien unter kontrollierten Bedingungen in einem Vakuum über einen langen Zeitraum erhitzt werden.

Dabei ist eine Temperaturobergrenze zu beachten, um Schäden an den OPV Modulen zu vermeiden. TPU-Folien wurden für dieses Projekt in zwei Stärken (0,38 und 0,76 mm) betrachtet. Mit den stärkeren Folien können Material- und Geometrieabweichungen bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden.



cover layer polycarbonat	(0,35 or 1 mm)
2nd tpu [hot melt] layer	(0,76 mm)
opv [photovoltaic] layer	(0,3 mm)
1st tpu [hot melt] layer	(0,76 mm)
base layer polycarbonat	(1 to 6 mm)

Abb. 17: Planaufbau und Zusammensetzung aller Komponenten im

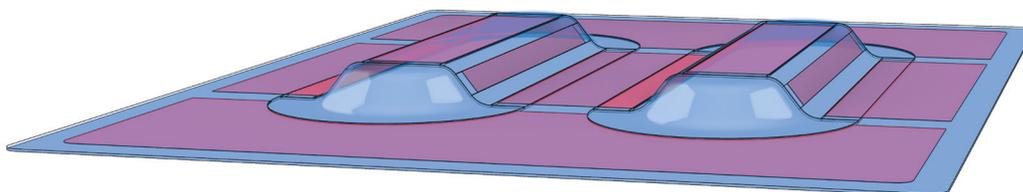


Abb. 18: Zusammensetzung aller Komponenten im Autoklav.

Ob das TPU eine Rolle bei der Geometriefindung spielt, war Gegenstand der folgenden Untersuchungen. Da TPU als Rohmaterial auf einer Rolle geliefert wird, wurde angenommen, dass es ähnlich einem Textil bei zweifacher Krümmung zu Faltenwurf führt. In der Folge würde dies auch bei der Geometriefindung zu beachten sein, da es nur an planaren oder einfach gekrümmten Flächen problemlos einzulegen wäre. Mit der exemplarischen Abwicklung der beiden Schichten Hotmelt (Abb. 19) wurden die potenziell problematischen Stellen identifiziert.

Die erforderliche Abbildungsgenauigkeit der Sickenradien für das Laminieren sollte daher über Materialversuche getestet werden, um zu überprüfen, ob diese blasenfrei verklebbar sind.

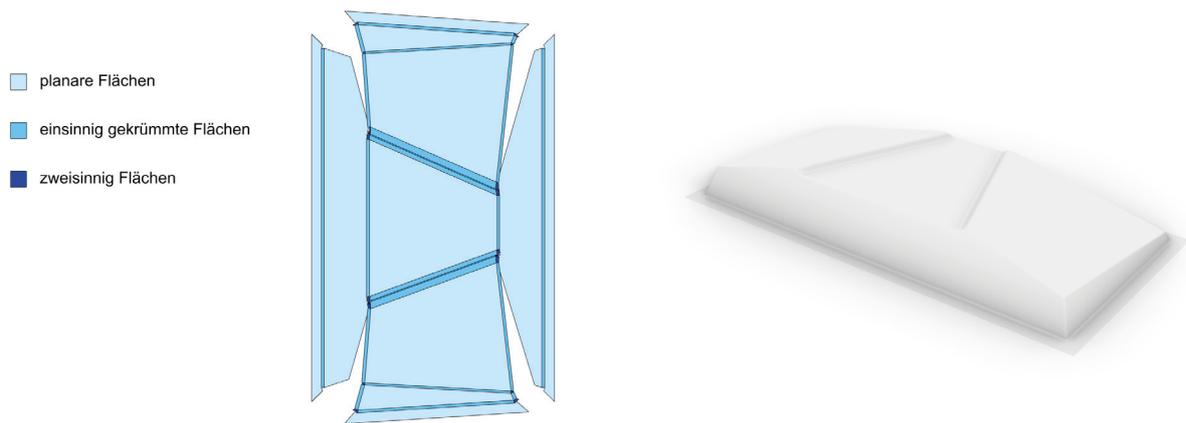


Abb. 19: Exemplarische Abwicklung der TPU-Schicht/ Hotmelt bei einer Beispiel-Geometrie

Da diese Prozessschritte in der Geometriemodellierung für den Architekturbereich vergleichsweise komplex sind, da sie eine geringe Teiletoleranz von weniger als einem Millimeter benötigen, wurden an dieser Stelle Materialalternativen und vereinfachte Herstellungsstrategien diskutiert.

So wurde angedacht, die OPV nur in planaren Bereichen zu integrieren und evtl. auch nur für diese Bereiche die Polycarbonat-Tragschicht mit einer Sandwichdeckschicht zu versehen. Vom Projektpartner Işık wurden erste Klebeversuche mit UV-aktivierten, durchlässigem Flüssigklebstoffen durchgeführt (Abb. 20).



Abb. 20: Klebeversuche mit Ultraviolett aushärtendem Klebstoff von Işık -Plastik

Ultraviolett aushärtender Klebstoff, der für den Einsatz auf Thermoplasten mit hohen optischen Anforderungen an das Erscheinungsbild entwickelt wurde, bietet folgende Vorteile:

- Eine starke, flexible Klebeverbindung
- Eine schnelle Aushärtung mit Lampen geringer Leistung auf PC, PET, PVC, ABS und PMMA
- Die Aushärtedauer beträgt ca. 30 min.
- Die Klebeverbindung muss folgende Eigenschaften aufweisen:
- Hohe Verbundwirkung
- Lange Lebensdauer der Klebeverbindung und UV-Stabilität
- Vergilbungsfreiheit

Der Nachteil der Flüssigverklebung ist die benötigte Schichtstärke, da ebenfalls die Aufbauhöhe der OPV von 1 bis 2 mm berücksichtigt werden muss, sowie eine luftdichte und blasenfreie Verbindung der Bauteilschichten.

Lufteinschlüsse im Bauteil sollten wegen möglicher Kondenswasserbildung zwischen den beiden Schichten PC vermieden werden.

Daher wurde für das Projekt die Konfektionierung und Einbringung von zwei TPU-Hotmelt Schichten weiterverfolgt (Abb. 21). TPU-Folien lassen sich mithilfe von CNC-Schneidplotttern bearbeiten. Durch die Flexibilität der Folien ist eine Anpassung an einfache Krümmungen im Bauteil möglich. Idealerweise entstehen ausschließlich planare Verklebungen. Ob zweifach gekrümmte Klebestellen möglich sind, war zu diesem Zeitpunkt wie bereits angemerkt noch Gegenstand von Untersuchungen.

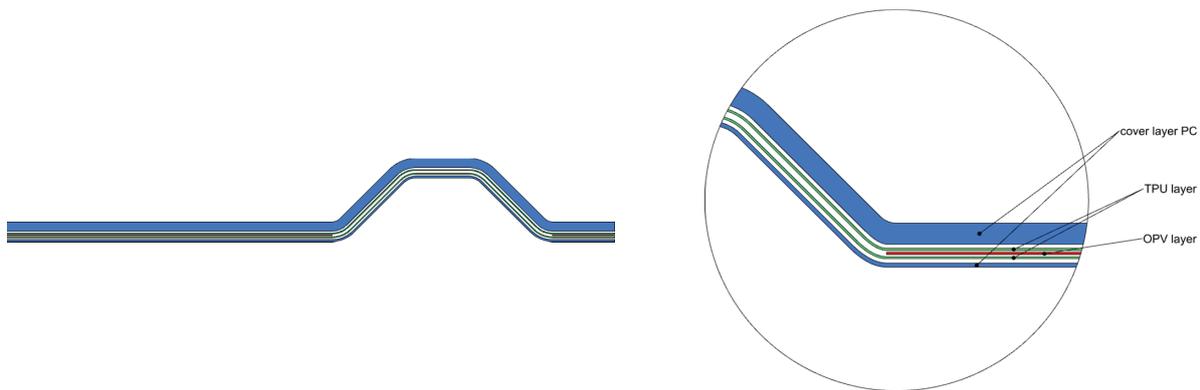


Abb. 21: Schematische Darstellung des Aufbaus mit einer vollflächigen TPU- und PC-Schicht.

Um Kenntnisse über die Extremwerte der jeweiligen Applikation des TPU zu bekommen, wäre eine experimentelle Ermittlung der Grenzwerte denkbar. Darüber wäre es möglich, bei der Geometrieerzeugung spezifische Maximalradien in der Flächenkrümmung festzulegen. Da dies außerhalb der Aufgabenstellung des Arbeitspakets lag, wurden im Projekt auf gering gekrümmte Flächen entwickelt, für welche die Flexibilität des TPU ausreicht.

Alternative Lösungsansätze umfassten etwa die nur teilweise Verklebung der Folien im Bereich der OPV Integration (Abb. 22 und Abb. 23). Ein solcher Ansatz wurde zum Ende des Projekts von Işık-Plastik im Versuch erprobt (Ausblick 1.4.7).

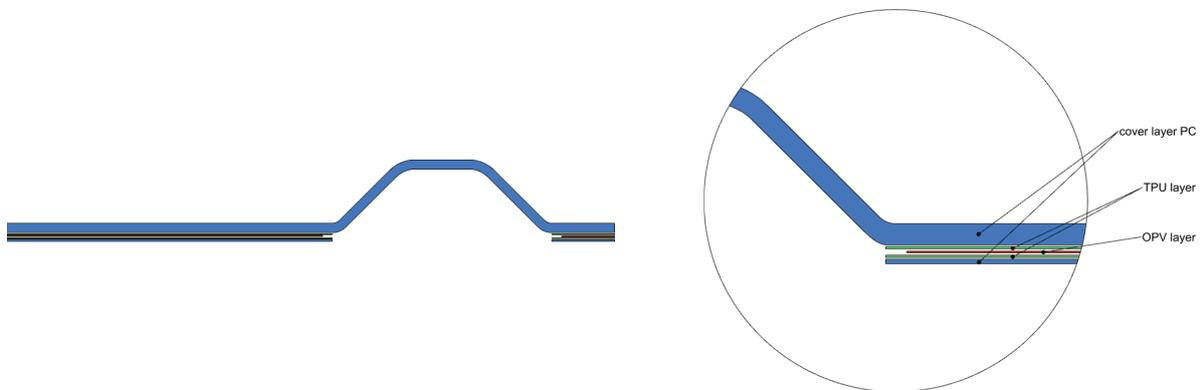


Abb. 22: Schematische Darstellung des Aufbaus mit partieller TPU- und PC-Schicht.

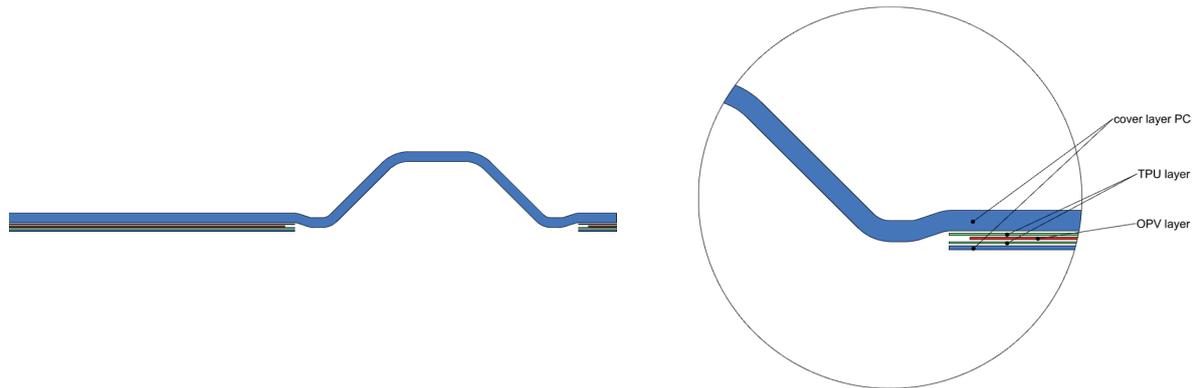


Abb. 23: Schematische Darstellung des Aufbaus mit partieller TPU- und PC-Schicht, in Mulde abgesetzt.

1.1.9.1. Stand der Technik Kunststoffe im Fassadenbau – Fokus Polycarbonate

Polycarbonat ist im Thermoforming anspruchsvoller als andere Thermoplaste. In diesem Kontext hat der Industriepartner Işık die Frage nach alternativen Werkstoffen aufgeworfen, beispielsweise Polypropylen PP, Polyethylen PE, Polyethylenterephthalat PET oder PMMA (Acrylglas).

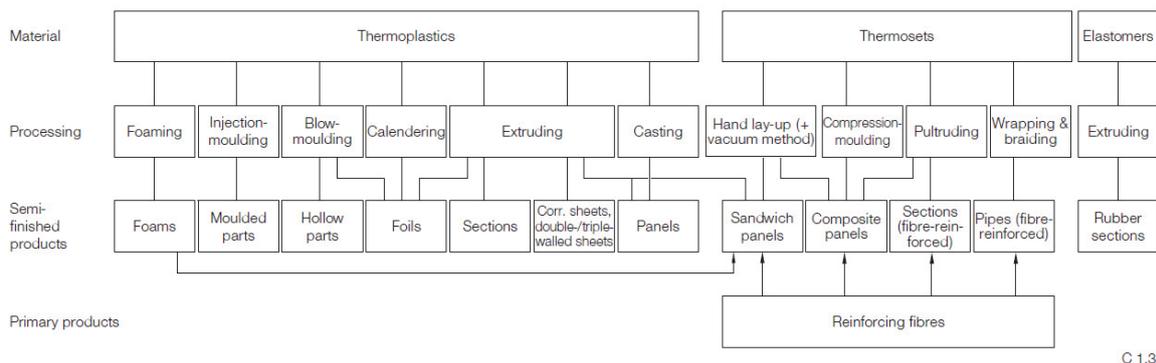


Abb. 24: Das Diagramm zeigt die drei großen Materialgruppen und ihre unterschiedlichen Weiterverarbeitungsprozesse und welche Halbzeuge daraus entstehen (Knippers et. al. 2010, S.69).

In der Gesamtschau der Eigenschaften verschiedener Thermoplaste (Abb. 24) für den Einsatz als Träger für OPV-Elemente in Fassaden und Überdachungen bleibt Polycarbonat das am besten geeignete Material.

Wesentlich sind hierbei Eigenschaften wie die hohe Festigkeit und Steifigkeit, aber ebenso die hohe Schlagzähigkeit. Das bedeutet, dass Polycarbonat nicht oder nur schwer splittert (Kern, 2023). Hinzu kommen vorteilhafte Eigenschaften wie eine gute Formbeständigkeit bei zugleich hoher Gebrauchstemperatur. Des Weiteren hat Polycarbonat eine geringe Aufnahme von Feuchtigkeit sowie eine gute Isolation gegen elektrische Spannung, ist jedoch schwer entflammbar (PlasticExpress, 2023). Polycarbonat hat sehr gute optische Eigenschaften, welche denen von Glas ähneln und einen hohen Licht-Transmissionsgrad, was dazu führt, dass Polycarbonat oft als Ersatz für Bauteile/ Produkte aus Glas verwendet wird. Die Summe an positiven Eigenschaften macht Polycarbonat für diesen Anwendungsfall zu einem geeigneten Kunststoff.

Bauteile aus Polycarbonat können auf unterschiedliche Art für architektonische Bauteile genutzt werden. Da sie transparent, transluzent und farbig hergestellt werden, sind sie allgemein überall dort einsetzbar, wo Gläser oder andere flächige Baumaterialien substituiert werden sollen und die Anforderungen des Brandschutzes unterhalb der Kategorie A (DIN EN 13501-1:2019-05) (nicht brennbar) bleiben - also für fast alle Arten von Fassadensystemen und Überdachungen bis Gebäudeklasse 4⁷ unterhalb der Hochhausgrenze. Konstruktionen aus Polycarbonat können in Abhängigkeit von der Anwendung oftmals leichter ausgeführt werden als solche aus Glas. Polycarbonate haben zudem eine relativ gute Recyclingfähigkeit und könnten in Zukunft perspektivisch durch Biokunststoffe (Schwarzmann, 2019) ersetzt werden.

Anders als Membranlösungen, wie z.B. ETFE Folien, können diese Platten dreidimensional ausgesteift werden, was den Einsatz als selbsttragende und leichte Bauteile in Standardsystemen ermöglicht. Polycarbonate zeichnen sich durch ihre hohe dreidimensionale Formbarkeit aus und bieten somit einen großen Spielraum für die Gestaltung von Fassaden im Vergleich zu Glasbauteilen (Abb. 25).



Abb. 25: Thermogeformte Halbschale aus Polycarbonat (Wohnwagenfenster)

Bauteile aus Polycarbonat gibt es in Form von Massivplatten und extrudierten Steg- und Wellplatten. Diese werden von mehreren Herstellern am Markt angeboten, z.B. unter den Bezeichnungen Makrolon® (Covestro) oder Lexan® (SABIC).

Nachteile wie geringe Abriebbeständigkeit oder die Versprödung durch langwelliges UV-Licht lassen sich durch entsprechende Beschichtungen ausgleichen. Hohe dynamische Belastungen, Kerbempfindlichkeit und die Anfälligkeit für Spannungsrisse müssen durch entsprechende gestalterische Maßnahmen ausgeglichen werden.

Ein weiterer Vorteil von Polycarbonat ist, dass es bereits im Fassadenbau eingesetzt wird und auch als Massenprodukt – z.B. Stegplatten für Überdachungen – erhältlich ist. Es sind also keine Zulassungsprobleme zu erwarten. Zudem gibt es eine größere Anzahl an Referenzprojekten, bei denen bereits flache Polycarbonat-Folien zur zusätzlichen Kapselung von OPV-Modulen verwendet werden (Abb. 26,27).

(7)

Vgl. Hessische Bauordnung (HBO) §29 und Hessische-Hochhaus-Richtlinie (H-HHR) 3.4

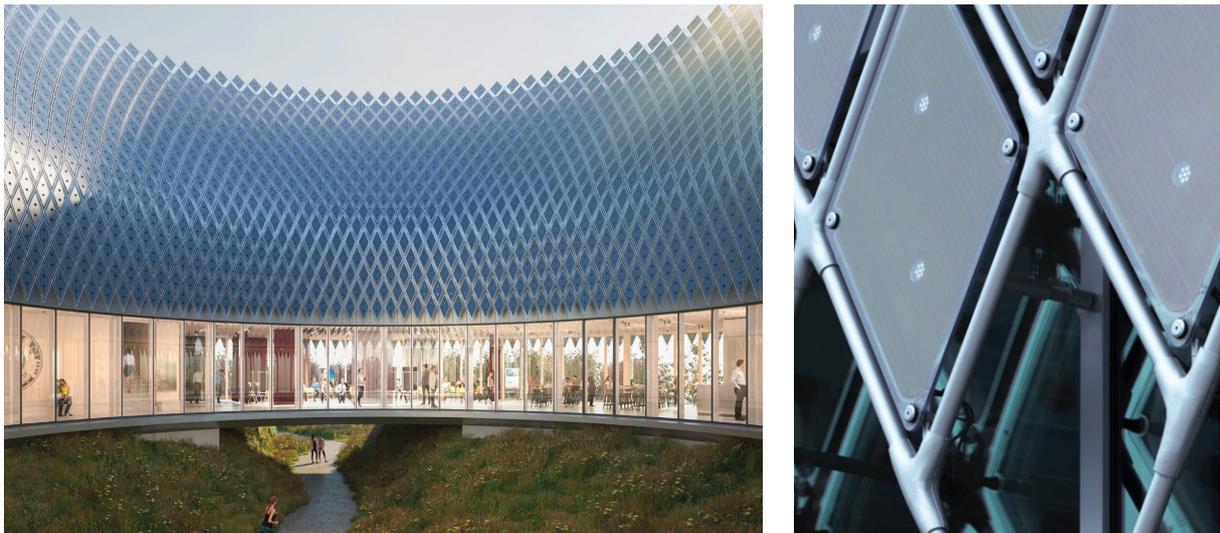


Abb. 26: Novartis-Pavillon in Basel

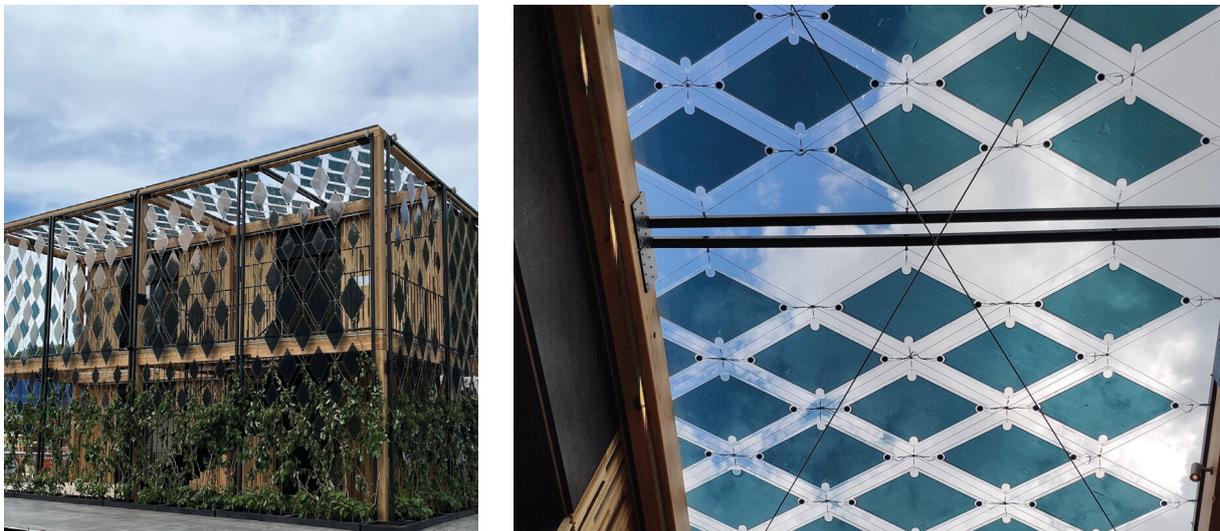


Abb. 27: Solar Decathlon Europe 21/22 in Wuppertal

Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit weisen Polymere aus Erdölbasis einen hohen Anteil an Primärenergie auf.

Ein dreidimensionales PC-OPV-PC Trägersystem bietet eine erhebliche Materialeinsparung für den Bereich der gebäudeintegrierten PV (BiPV)⁸, im Vergleich mit Glas-OPV-Glas Systemen oder planaren PC-OPV-PC Bauteilen (Abb. 28).

Das durchschnittliche Gewicht eines dreidimensional optimierten PC-OPV-PC Sandwiches beträgt unter 4 kg/m². Das entspricht einem CO₂-Äquivalente (CO₂e) von ca. 30 kg CO₂ (ohne Berücksichtigung der TPUs und OPV).

Joost Hartwig betont, dass die Leichtigkeit mit anderen Nachteilen erkaufte wird, aber unter dem Strich immer noch ressourceneffizienter ist als viele andere Konstruktionsformen (Hartwig, Zeumer, 2012) wie etwa Glas.

(8)
Building-Integrated-Photovoltaic

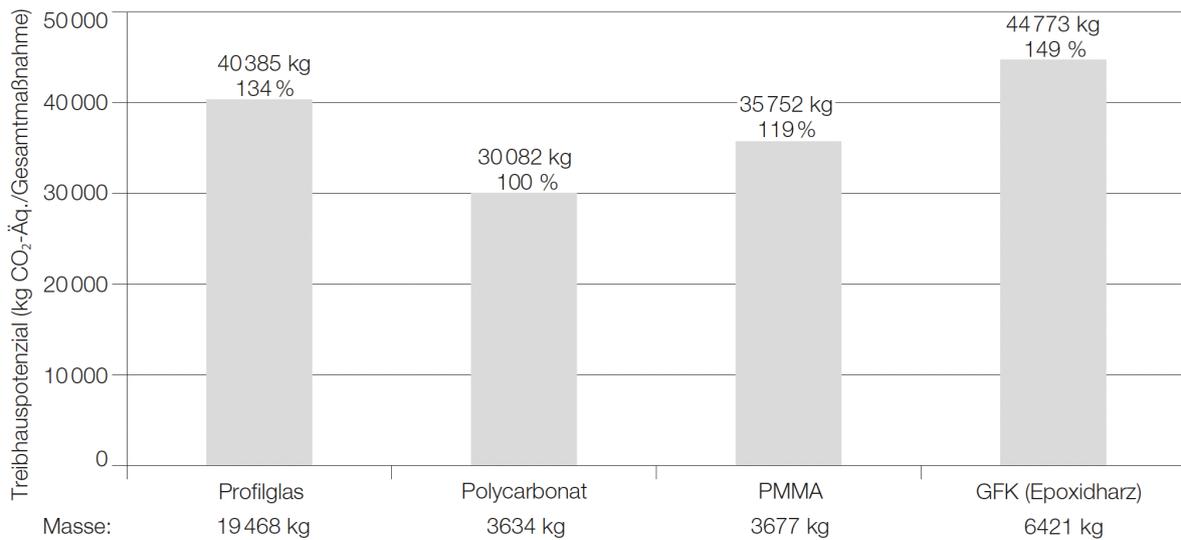


Abb. 28: CO₂-Äquivalente (CO₂e) für verschiedene transparente Bauteile (Hartwig und Zeumer in: Knippers et al. 2010, S. 129)

1.1.9.2. Recherche Verstreckung beim Thermoformen

Ein bekanntes Phänomen beim Herstellen von Tiefzugteilen ist die Verstreckung, also das Ausdünnen des Querschnitts beim dreidimensionalen Umformen eines ursprünglich zweidimensionalen Materials. Rechnerisches Ermitteln und experimentelles Überprüfen sind Möglichkeiten, den Verstreckungsgrad zu bestimmen. Geometrische Anpassungen und andere konstruktive Maßnahmen sind Möglichkeiten, den Verstreckungsgrad zu mindern (Abb. 29), (Abb. 30).

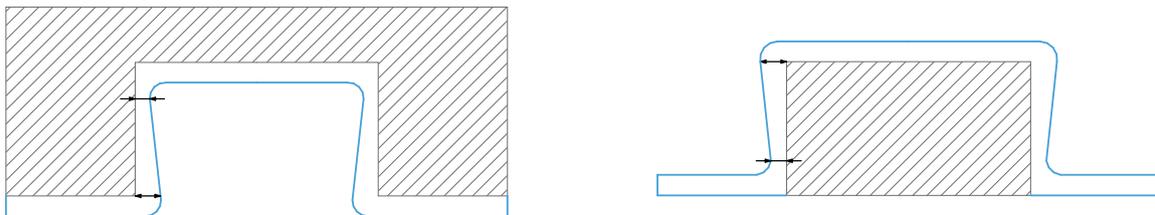


Abb. 29: Positiv- und Negativverformung, nach „Thermoformen in der Praxis“ (Schwarzmann, 2016)

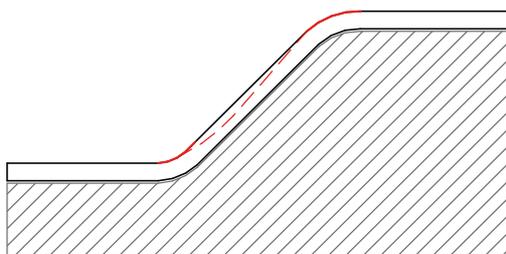


Abb. 30: Verstreckung, nach „Leichtbau durch Sicken“ (Reitter, Bretten, 2013)

Relevant ist dies für die statische Leistungsfähigkeit des Trägerelements und die notwendige Passgenauigkeit für das Zusammenfügen der Teile - die je nach verwendeter TPU-Folie bis in den niedrigen Zehntel-Millimeterbereich reichen muss. Die statische Leistungsfähigkeit kann beispielsweise über ein vereinfachtes 2D-FE-Modell des Bauteils ermittelt werden. Für die Simulation des Materials wird die geringste Wandstärke verwendet.

1.1.10. Gängige Auflagersituationen von Fassaden- und Dachelemente

In dieser Kurzrecherche wurden die überwiegend verwendeten Auflagersysteme für die Fassadenintegration von selbsttragenden Bauteilen zusammengefasst: Pressleisten, Punkthalterungen und Klemmhalterungen.

Im Regelfall werden Punkthalterungen sowie Press- und Klemmleisten in der Fassade aufgrund unterschiedlicher gestalterischer Wirkung verwendet (Abb. 31). So finden sich Punkthalterungen oft im Bereich von Seilkonstruktionen, um auch optisch eine möglichst leichte Anmutung zu erreichen. Hingegen finden sich Press- und Klemmhalterungen klassisch im Bereich von Pfosten-Riegel-Fassadenkonstruktionen (Abb. 32).

Für Konzeption, Simulation und Entwurf des Sun Skins Trägerelements in diesem Vorhaben wurden Punkthalterungen gewählt, da hier die Kräfte zweiachsig in die Auflagerkonstruktion abgeleitet werden und damit die statisch anspruchsvollste Einbausituation gegeben ist.

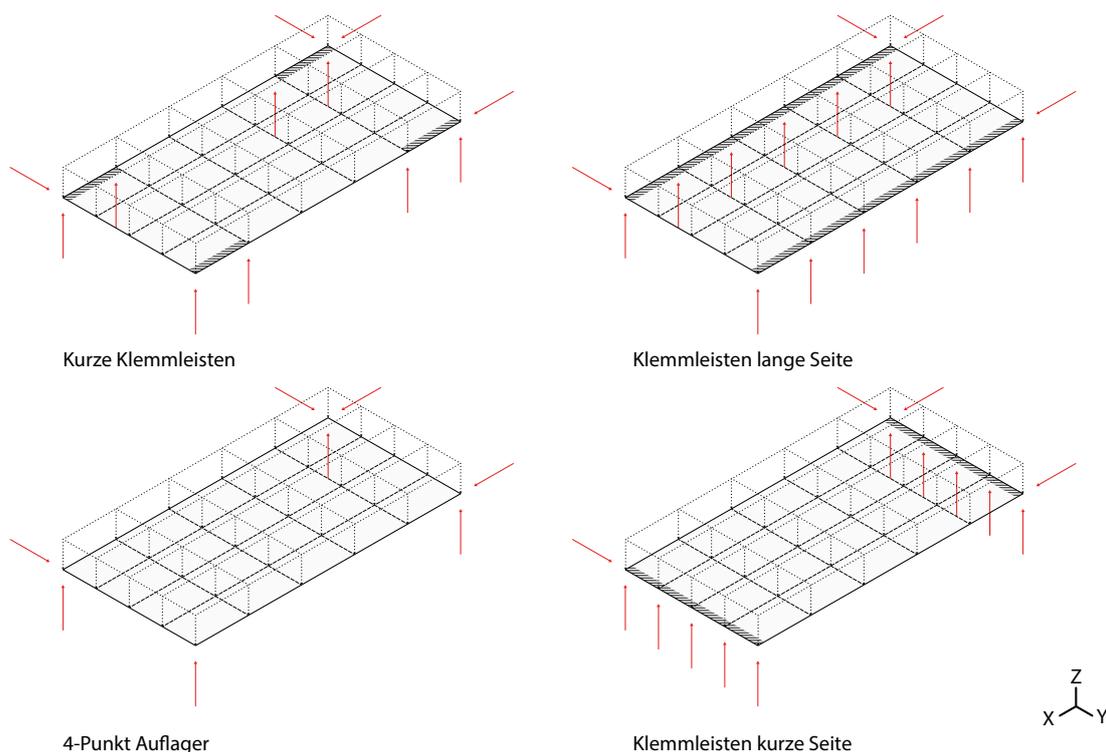


Abb. 31: Visualisierungen verschiedener Auflagersituationen für die Fassadenanbindung

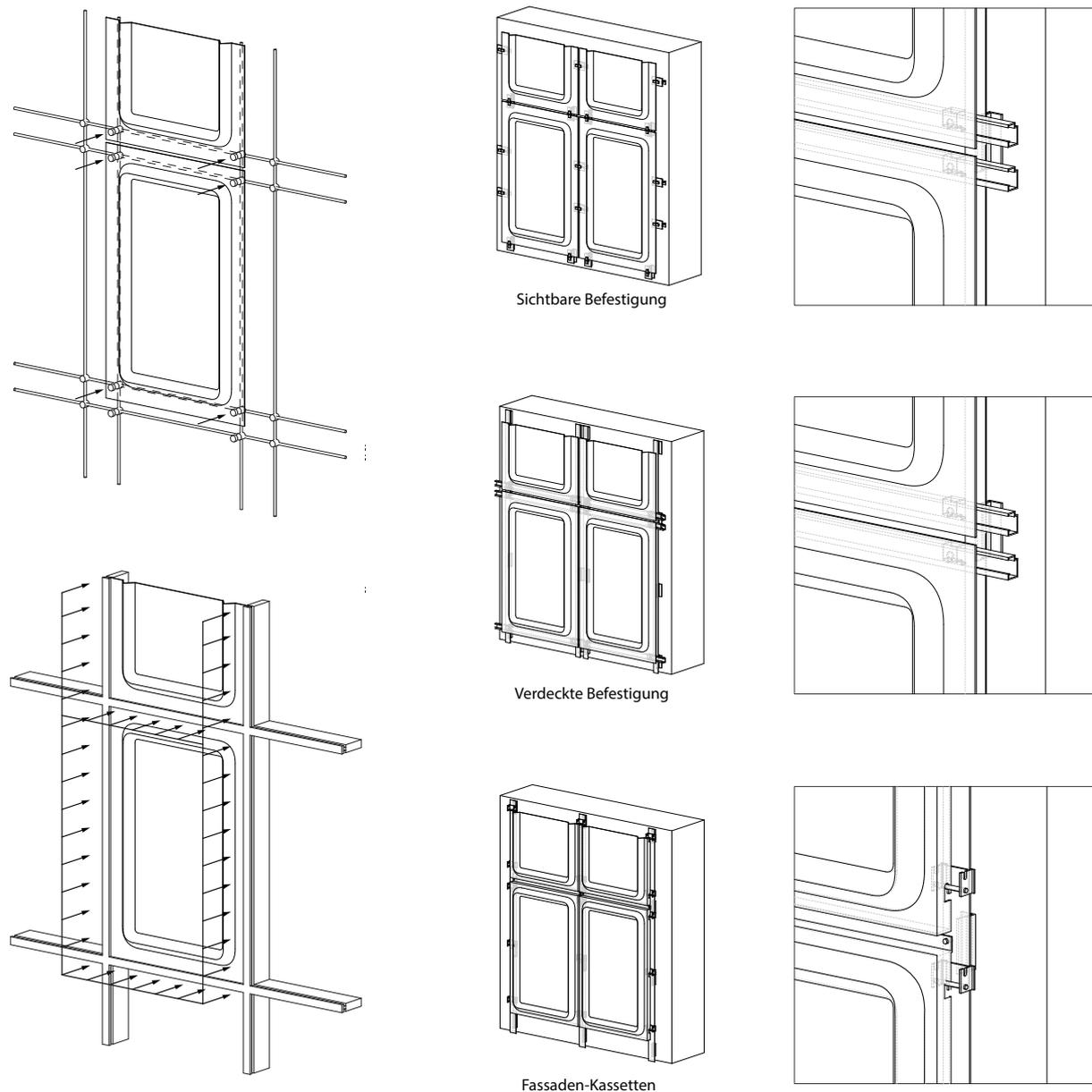


Abb. 32: (links oben) zeigt eine an Seilen montierte Punkthalterung, (links unten) ist ein Pfosten-Riegel System zu sehen, (mittig / rechts) unterschiedliche Montagevorschläge

1.1.11. Vorgezogen: Grundlegende Erkenntnisse zum Tragverhalten und vereinfachte FEM-Simulation

Durch die thermoplastische Umformung ist das Sun Skins Bauteil durch die aussteifende Wirkung der Falten, Rippen und Sicken definiert, die eine Membrantragwirkung für die ebenen Elementbereiche aktivieren.

Es können zwei Arten von Tragverhalten unterschieden werden, die den in 1.1.10 beschriebenen Konstruktionstypen entsprechen.

Die Rippen wirken als Träger, die die ebenen Elementbereiche als mitwirkende Platten aktivieren (Abb. 32, links)

Die Krümmung der Gesamtgeometrie erzeugt eine Schalentragwirkung, die umrandenden Rippen ermöglichen einen Kurzschluss der Bogenschubkräfte. Die Lagerung erfolgt statisch bestimmt (Abb. 32, rechts) über zwei Linienauflager oder statisch bestimmte Vierpunktlagerung.

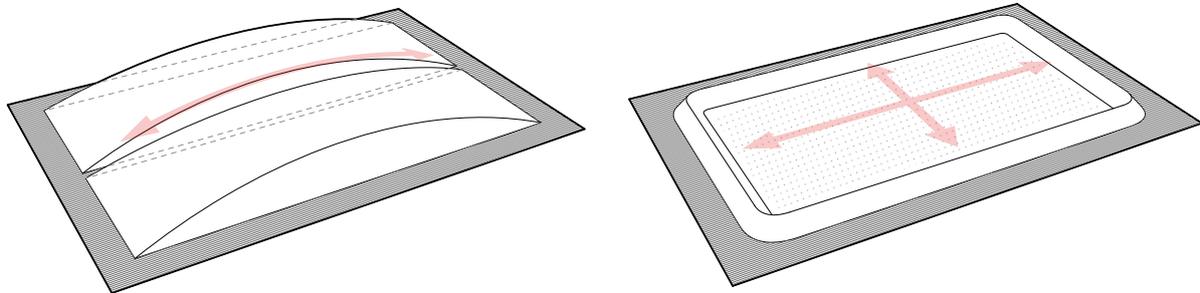


Abb. 33: Angenommene Auflagerkonfiguration für die vereinfachte FEM-Simulation mit Los- und Festlagern

Für die weitere Bearbeitung wurde eine 4-Punkt Auflagersituation angenommen (Abb. 33). Ein Lager wird als fest eingespannt angenommen, jeweils ein Lager in Z und X bzw. Y gehalten, und ein Lager nur in der Z-Richtung.

Dies entspricht dem Einbau in einer Fassade, der Bewegungen durch thermische Ausdehnung zulässt.

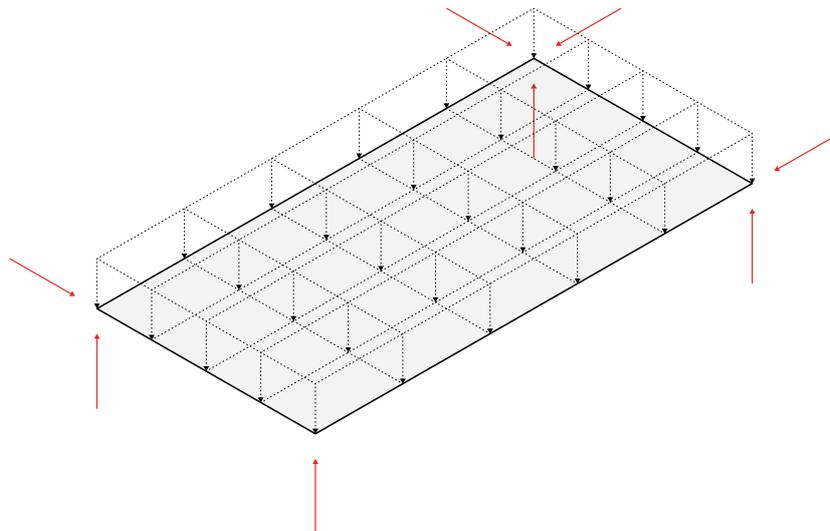


Abb. 34: Die angenommene Auflagerkonfiguration für die vereinfachte FEM-Simulation. Zu sehen sind die unterschiedlich eingestellten Fest- und Lospunkte sowie Flächenlast.

Neben dem Eigengewicht wurde zunächst eine idealisierte Flächenlast von 500 Newton/m^2 für die ersten Versuche angenommen. Später wurde diese auf 1000 Newton/m^2 erhöht, um auch kritische Windlasten abzubilden. Schneelasten wurden aufgrund des primären Anwendungsfalls Fassade und einer daraus resultierenden vertikalen Ausrichtung nicht berücksichtigt.

Ergänzend zu AP1 wurde eine digitale Simulation aufgesetzt, um die Verformung des Testkörpers zu bestimmen (Abb. 35). Dafür wurde eine „Shell“-Verformungsanalyse mit dem Plug-in Karamba3D© (Preisinger, 2013) innerhalb der grafischen Programmierumgebung Grasshopper© im 3D-Programm Rhinoceros3D© (beide McNeel, 2023) aufgesetzt.

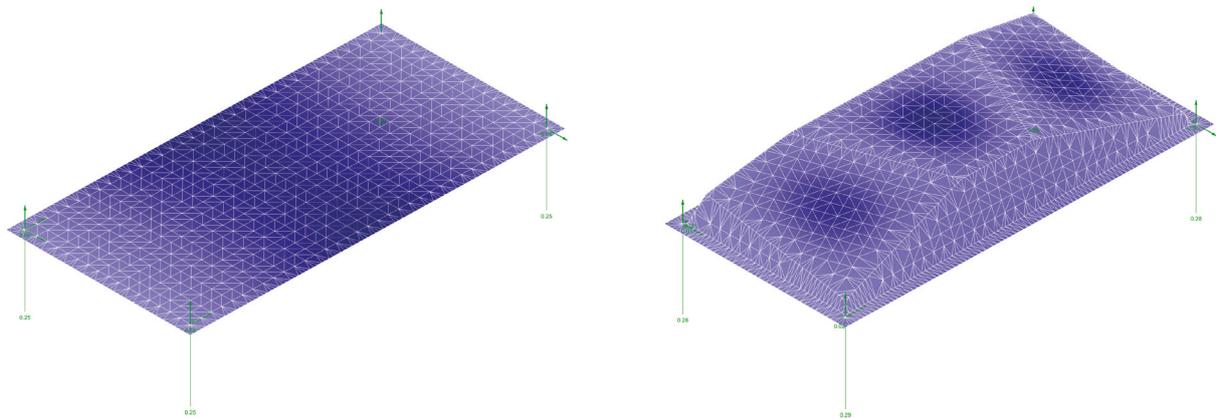


Abb. 35: Eine rechteckige Folie mit den Maßen 1.60x0.8m wird simuliert; eine dreidimensional geformte Folie mit den gleichen Maßen wird simuliert.

Diese schnelle Simulation ermöglicht eine vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Geometrien über ihre Verformungswerte (Abb. 36). Die dunklere Farbe zeigt die Bereiche der Bauteile mit der stärksten Durchbiegung.

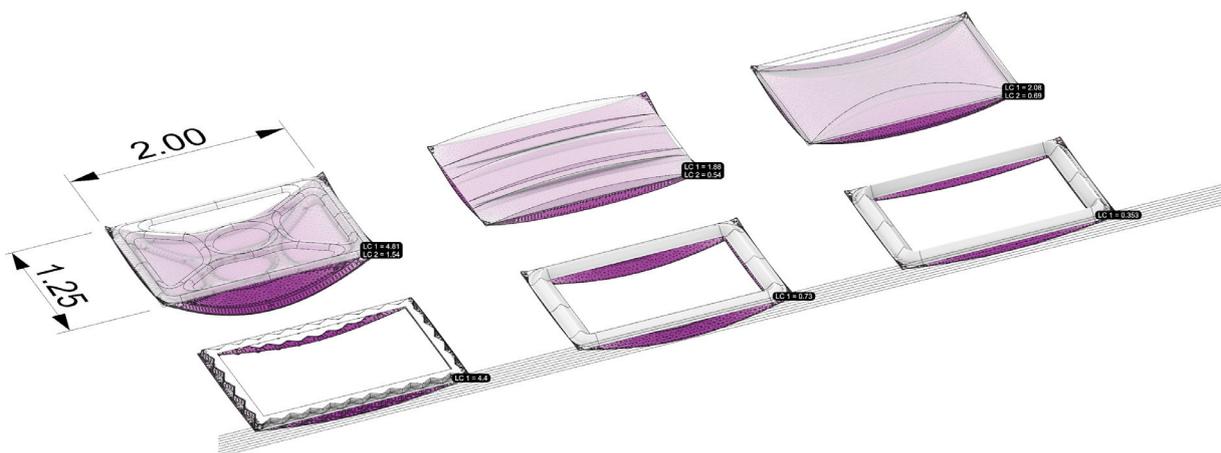


Abb. 36: Simulation von drei Geometrietopologien (hintere Reihe) und unterschiedlichen Randausbildungen (vordere Reihe).

Die Simulation bildet nur die Verformung unter Last ab, der Versagensfall wird bisher nicht abgebildet. Die Simulation ist daher nur bedingt aussagekräftig, da auch dann Verformungswerte angezeigt werden, wenn die Tragfähigkeit des Bauteils bereits überschritten ist.

Daher wurden ergänzend die im AP 2 beschriebenen kleinmaßstäblichen physischen Experimente mit 0,5 mm Polypropylen (PP) – Folien durchgeführt.

1.1.12. Bewertung und Synthese der Recherche

Aus der Recherche zur Ausformung eines tiefgezogenen Teils, der Einfluss- und Zielgrößen auf dessen Geometrie konnte eine Reihe sich wechselseitig beeinflussenden Randbedingungen beobachtet werden.

Von Bedeutung sind etwa die Neigungswinkel vertikaler Flächen. Sind diese zu steil, ist das Ausformen des Teils schwer bis unmöglich. Eine Beschädigung des Teils oder der Form wäre wahrscheinlich.

Manche davon ergänzen sich in positiver Weise, wie etwa die geometrische Logik einer günstigen TPU-Verklebung zur Krümmungsfähigkeit der OPV. Andere stehen in direktem Widerspruch, wie die Ausbildung einer günstigen Sickengröße im Zusammenspiel mit der Fläche für die solare Energiegewinnung. Diese Einflussgrößen muss das spätere parametrische Modell verhandeln und abbilden können.

Als Vorbereitung für AP 2 wurde eine gestalterische Synthese der unterschiedlichen Randbedingungen anhand eines breiten Spektrums an Formen durch Entwurfsstudien erforscht (Abb. 37).



Abb. 37: Übersicht der geometrischen Gestaltungsvarianten

Diese Geometrien wurden zusätzlich im AP 2 ausschnittsweise mit physischen und digital simulierten Belastungstests überprüft.

1.1.13. Bewertungsmatrix entwerfliche Vorversuche

Die Bewertungsmatrix ist wie die Checkliste für die Sicken als Entwurfswerkzeug konzipiert, das eine überwiegend qualitative Bewertung wenig detaillierter Trägergeometrien ermöglicht und parallel Potenziale für eine Weiterentwicklung abschätzt (Abb. 38).

- Folgende Aspekte sind abgebildet:
- Eignung für die identifizierten Auflagersituationen
- Integration der OPV Module
- Komplexität der Trägergeometrie
- Sicken
- Statische Leistungsfähigkeit, Ästhetik – semantisches Differenzial und Formbewertung

Kriterien:	Auswertung 1		Auswertung 33		Auswertung 45	
Befestigung						
Vier-Punkt	JA	1	JA	1	JA	1
Klemmleisten (zweiseitig)	JA	1	NEIN	0	JA	1
Klemmleisten (zweiseitig) + zusätzlicher Rand	NEIN	0	JA	1	NEIN	0
Geometrie des Bauteils / Einbindung Zelle						
planar	JA	1	NEIN	0	NEIN	0
einsinnig	NEIN	0	JA	1	NEIN	0
zweisinnig	NEIN	0	NEIN	0	JA	KO Kriterium
OPV / Integration						
Fläche	1	1	0,75	0,75	0,5	0,5
Hotmelt Abwickelbarkeit (vollflächig)	1	1,5	0,75	1,125	0,25	0,375
Hotmelt Komplexität	0,25	-0,25	0,5	-0,5	0,5	-0,5
Statik						
Abschätzung, Qualität der räumlichen Aussteifung	JA	0,25	JA	0,25	NEIN	0
Messwerte, Statische Performance (Displacement/ Spannung)	1	2	0,75	1,5	0,25	0,5
Optimierung						
Optimierungspotenzial	0,75	0,375	0,5	0,25	0,75	0,375
Gestaltung						
Gestaltungspotenzial	1	0,5	0,75	0,375	0,75	0,375
GESAMT	8,375		6,75		3,625	

Abb. 38: Exemplarische Darstellung von verschiedenen Form-Auswertungen

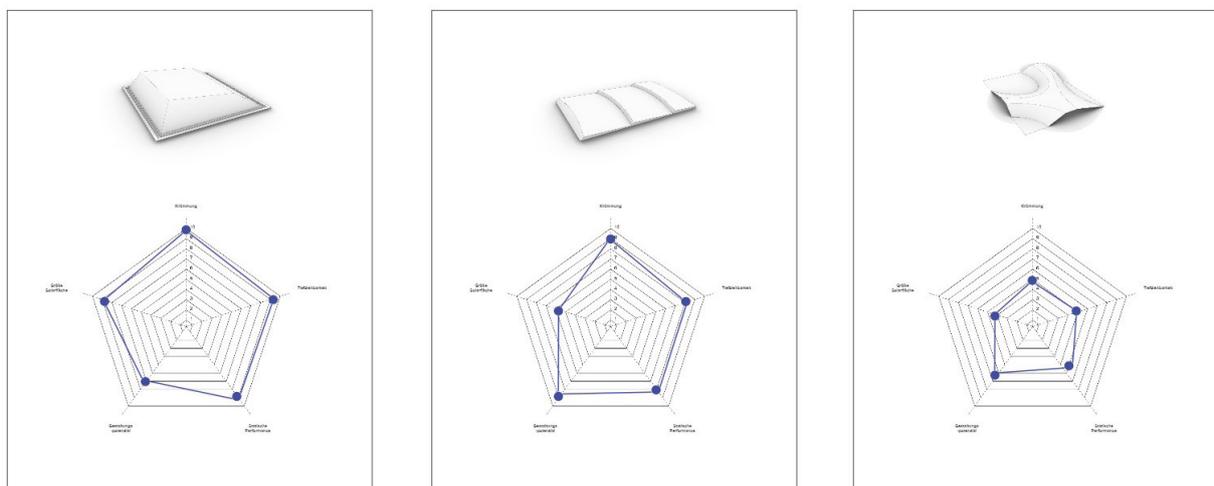


Abb. 39: Beispielhafte Auswertung von entwerflichen Vorversuchen mithilfe von Netzdiagrammen

Die Auswertung der verschiedenen Geometrien findet über eine Bewertungsmatrix statt (Abb. 39). Zunächst werden die relevantesten Parameter und Einflussgrößen identifiziert, nach denen die Geometrien unterschieden und deren Potenziale eingeordnet wurden.

Hierfür wurden für die zuvor aufgeführten Bewertungskriterien unterschiedliche Gewichtungen festgelegt, je nachdem, wie groß deren Einfluss auf die Performanz ist, bzw. wie wichtig diese Eigenschaften im jeweiligen Kontext sind. Nach der zuvor festgelegten Bewertungssystematik wurden darauffolgend für jede individuelle Geometrie die entsprechenden Kennwerte ermittelt. Anschließend konnte dann für jede Geometrie eine Summe gebildet werden, welche stellvertretend für die gesamte Performanz steht, unter Berücksichtigung der verschiedenen Anforderungen und Einflüsse auf das Bauteil.

Ziel war es herauszufinden, welche Entwurfparameter den größten Einfluss auf die Performanz eines Bauteils, bzw. auf die Gestaltung seiner Geometrie haben und wie sich diese Parameter untereinander beeinflussen. Was sind die relevanten Entwurfparameter für eine geeignete Trägergeometrie? Mithilfe dieser Matrix wurden Kennwerte für den weiteren Entwurfsprozess festgelegt und in einen Leitfaden überführt.

Anhand dieser Vor-Bewertung wurde ein Ranking der zehn aussichtsreichsten Grobformen erstellt als mögliche Kandidaten für eine weitere Bearbeitung (Abb. 40). Die in der Bewertung beste Geometrie wurde als Grundlage für eine Überarbeitung und weiteres Untersuchen der Detaillierung (Sicken, Einbindung in die Fassade) herangezogen.

Die am besten bewerteten Geometrien beinhalten ausschließlich Konzepte mit planaren sowie einfach gekrümmten Flächen. Geometrien mit zweisinnig gekrümmten Flächen wurden ausgeschlossen, da die Erstellung eines Netzbildes für die TPU-Folien nicht möglich ist.

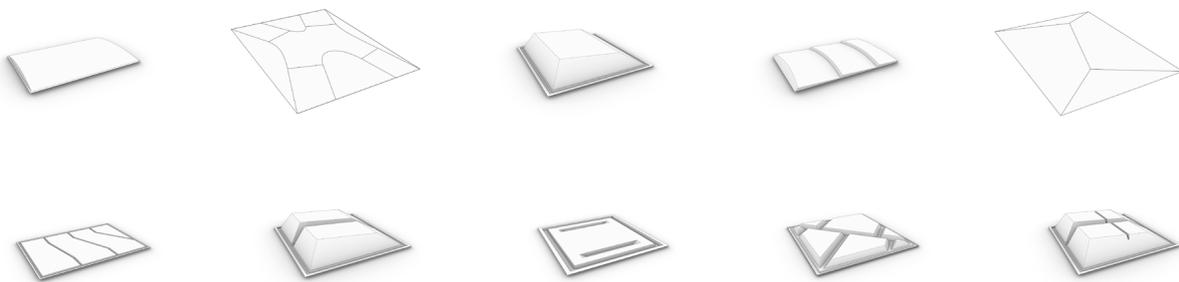


Abb. 40: Zehn prototypische Geometrievarianten mit der besten Performanz

1.1.14. Ergänzende Studien zur Rapportierung Architekturfassaden – Beispiele

Eine erste ästhetische Bewertung möglicher Träger-Geometrien auf der Großform versucht diese Recherche anhand von Beispielen und der Entwicklung eigener Formen. Wesentliche Parameter sind Skalierung, Art der Modularisierung, Vervielfältigung, Rapportierung, Detaillierungsgrad und Gradienten des beziehungsweise der Bauteile (Abb. 41).

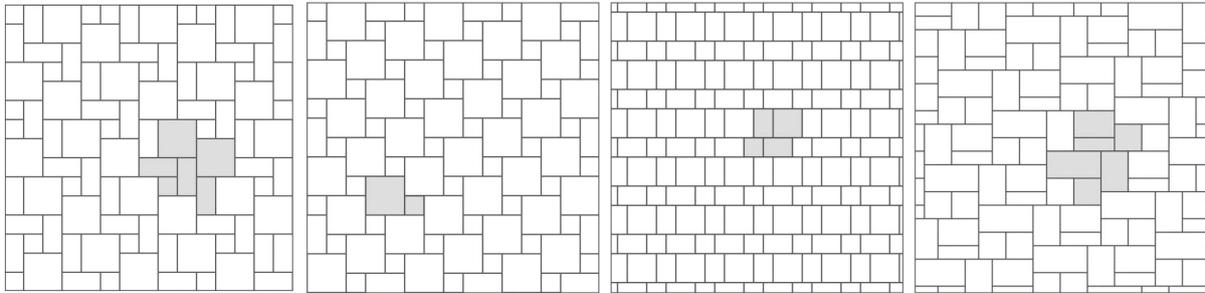


Abb. 41: Beispiele gängiger Rapportregeln/ Verlegemuster

Im nächsten Schritt wurden Modulgrößen und Größenverhältnisse vorformuliert. Ähnlich bekannter Standards wie etwa der DIN 476 (Papierformat) wurde hierbei zuerst die maximale Panelgröße mit 1600x800mm festgelegt (Abb. 41). Dieses Maß sichert zum einen die Kompatibilität mit handelsüblichen Tiefzugprozessen, als auch eine technisch gut umsetzbare Größe für den Fassadenbau. Daraufhin wurde das Ursprungsmaß viermal halbiert, woraus sich die Maße der jeweils kleineren Paneele ergeben. Für die weitere Betrachtung wurde der erste Halbierungsschritt ausgelassen, um Redundanzen zu reduzieren und bessere Rekombinierbarkeit zu gewährleisten. Mit diesen Paneelen wurden daraufhin erste Gestaltungsstudien angefertigt (Abb. 62, 63).

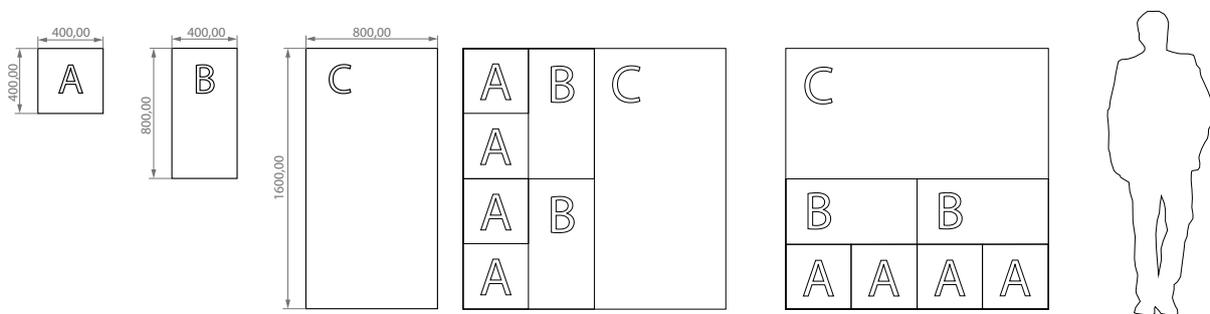


Abb. 42: Größen und Typen der jeweiligen Module

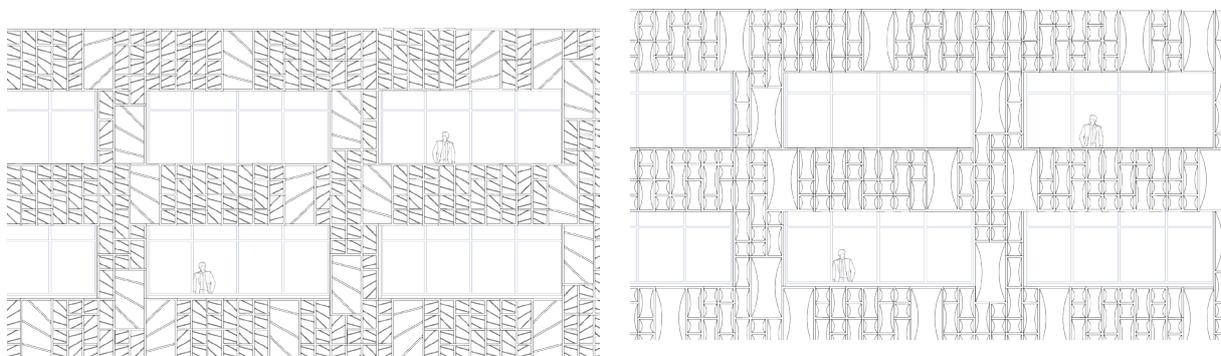


Abb. 43: Exemplarische Anwendung von Rapportregeln an einer Fassade

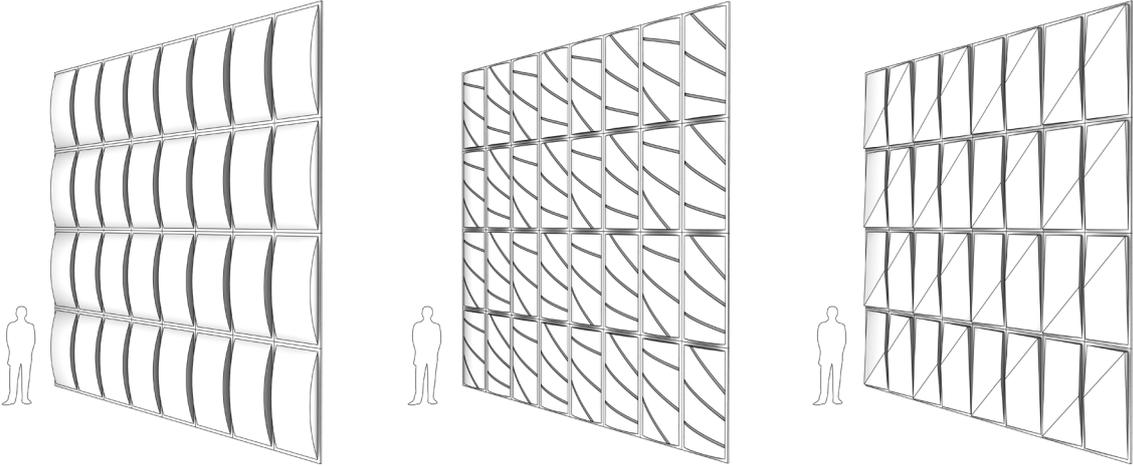


Abb. 44: Darstellung verschiedener Geometrien mit Solarzellen im Rapport

1.2. Arbeitspaket 2: Materialversuche, Systematisierung der Geometrieauswahl und Vorarbeiten Parametrisierung digitales Modell

Im AP 2 wurden geometrische Parameter, die sich aus den Recherchen aus AP 1 ergeben haben, anhand einer Serie von vereinfachten prototypischen Formen genauer untersucht.

In Erweiterung des ursprünglichen Vorhabens wurden im AP 1 einige zusätzliche Arbeitsschritte durchgeführt. So wurde eine Matrix zur qualitativen Bewertung entworfen Geometrien entwickelt. Mit dieser wurden dann die entworfenen Versuchsgeometrien aus AP 1 bewertet. Bestandteil der Bewertungsmatrix sind auch vereinfachte statische Berechnungen und physische Belastungstests, welche im folgenden Kapitel beschrieben werden.

Geometrische Parameter, die sich aus der Sickenrecherche ergaben, wurden im Vorgriff auf AP 3 bereits in ein parametrisches Modell überführt. Zusätzlich wurden verschiedene Simulationen für die Statik der Bauteile entwickelt. Zuerst wurde eine vereinfachte Simulation über das Grasshopper® Add-On Karamba3D® als digitales Modell zur vereinfachten Berechnung der Polycarbonat-Trägerfolien entwickelt. Ein präzisere Simulation auf Basis von RFEM® 6 (Dlubal, 2023) zur Überprüfung von Detailmodellierungen (z.B. kleinteilige Sickenausbildung) wurde zu diesem Zeitpunkt nicht implementiert.

In diesem Kontext wurden physikalische Versuche bzw. Versuchsreihen durchgeführt, welche sich in die folgenden drei Kategorien gliedern:

- a) Vorversuche im Modellmaßstab zur Aussteifung des Rands
- b) Die vom Industriepartner durchgeführten Tiefziehversuche
- c) Versuche mit maßstabsgetreuen Versuchskörpern

Kategorie a umfasste eine Reihe von kleinen Modellen, welche teilweise die Idee findende Grundlage für den Projektantrag waren, als auch kleine Modelle, welche am Beginn des Projekts auf der Tiefziehmaschine in der Werkstatt der FRA-UAS gefertigt wurden. Ihnen gemein ist ein explorativer Ansatz, wobei das Augenmerk auf dem Wirken und Wechselwirkungen von Faltungen, Knicken und Richtungsänderung in der Breite der Möglichkeiten lag.

Basierend auf dem parametrischen Modell wurde eine Testreihe für den Industriepartner Işık Plastik San. ve Dis Tic. Paz. A. (Işık) entwickelt. Diese Testreihe sollte geometrische Grenzwerte, unter anderem Mindestradien, für das Thermoformen von Polycarbonat-Folien unterschiedlicher Dicke (1 bis 4 mm) ermitteln und Abweichungen zwischen Form und Gegenform quantifizieren. Işık hat dazu eine eigene Tiefzugvorrichtung entwickelt und realisiert (Kategorie b).

Aus der Recherche der Sickenlehre hat sich ergeben, dass sich kleinteilige und sehr steile Sicken eher ungünstig auf das Tragverhalten auswirken. Dies wurde bei der Erstellung der tiefgezogenen Modelle berücksichtigt. Unter 1.1.7.3 wurden Tiefzugstrategien aufgezeigt, die eventuelle geometrische Toleranzprobleme für Sandwichkonstruktionen, bestehend aus zwei Schichten PC auffangen kann. Insofern konnte auf die Betrachtung von großer Toleranzen für die Abstände zwischen Form und Gegenform verzichtet werden.

Parallel dazu hatte die FRA-UAS außer Plan einige großformatige Tiefzugtests (2 und 4 mm Dicke) durchgeführt.

Ein räumlich schalenartig ausgeformtes Paneel von 70 x 70 cm und 2 mm Materialstärke wurde einem Belastungstest (kombinierter Druck, Zug, Biegeversuch) unterzogen. Mit einer Bruchlast von 0,8 kN wurde das Ergebnis als sehr positiv beurteilt, da es realistische Windlasten einer Fassade aufnehmen kann (Kategorie c).

1.2.1. Vorversuche Bewertung Randausbildung

In den Vorarbeiten zum Projekt wurde im Rahmen eines Seminars bereits eine Versuchsreihe zur statischen Bewertung kleinmaßstäblicher Trägergeometrien durchgeführt, die allerdings weniger aus Sicht statischer Erfordernisse, sondern vielmehr aus Sicht ästhetischer und fertigungstechnischer Überlegungen (zum Beispiel niedrigkomplexe Tiefzugformen), entwickelt wurden. Es wurden dabei wesentliche Erkenntnisse gewonnen, was die Vermeidung von Knicklinien und die Ausbildung des Randes der Trägerform anbelangt (Abb. 45).

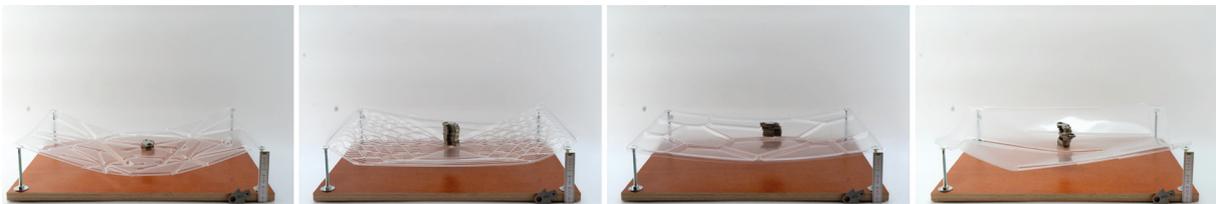


Abb. 45: Bildreihe von 4 Bildern aus den Vorversuchen; Abhängigkeit der Verformung zu Randsteifigkeit, Anzahl und Orientierung der Knicklinien

Daran anknüpfend sind in diesen Vorversuchen zur Randsteifigkeit zunächst sechs rechteckige Geometrien mit unterschiedlich ausgeformten, einfach abgesetzten Modellen und fünf rechteckige Geometrien, deren Ränder aus der Sickenlehre abgeleitet wurden, digital skizziert, tiefgezogen und einem Materialtest unterzogen worden. Zielsetzung war es, Schlüsselparameter aus der Sickenlehre mit Erkenntnissen aus den Vorarbeiten in Deckung zu bringen und zu überprüfen, ob vereinfachte FE-Simulation in Karamba3D© für die notwendige Abbildgenauigkeit ausreichend ist. Zusätzlich konnten erste Abschätzungen hinsichtlich der formalen Qualität unterschiedlicher Randformen vorgenommen werden.

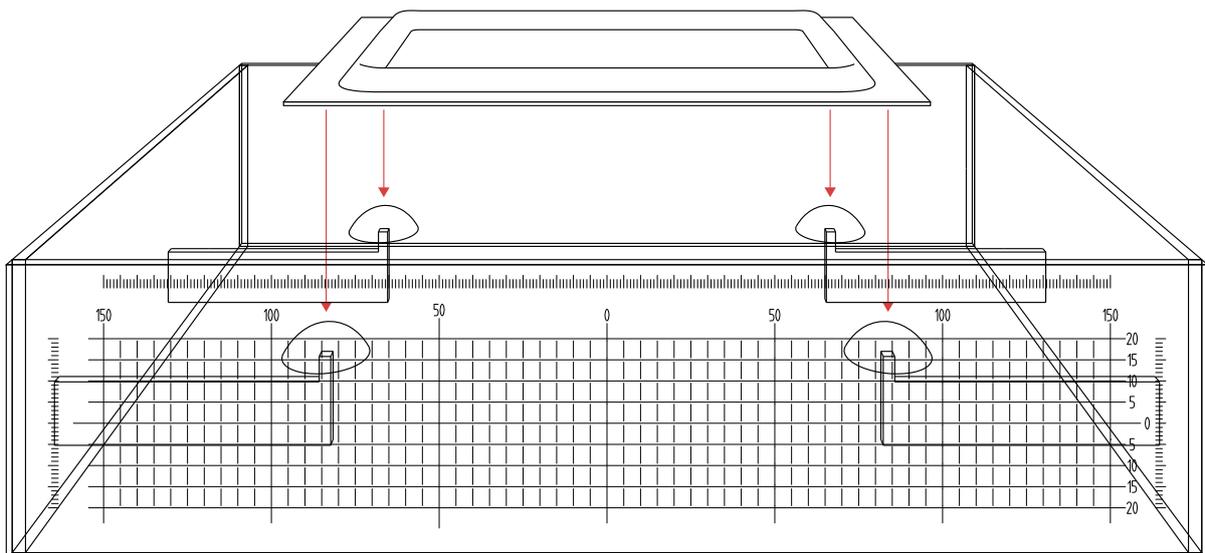


Abb. 46: Die Zeichnung zeigt den prinzipiellen Aufbau des Versuchs. Neben den vier Acrylglaswandscheiben (teilweise mit Skala) gibt es vier in der Länge verschiebbare Punktaufleger. Auf diesen wird der Versuchskörper platziert.

Die Abbildung zeigt den Aufbau der kleinmaßstäblichen Vorversuche zur Randsteifigkeit (Abb. 47). Auf vier Loslagern wird die zu testende Form platziert. Eine Flächenlast wird mittels Wasserbeutel aufgebracht (100, 200 oder 300 g Wasserbeutel). Die Abmessungen der Versuchsgeometrie betragen jeweils 200 mm * 125 mm (Abb. 47). Für die Tiefzugfolie wurde Polypropylen mit einer Stärke von 0,325 mm verwendet. Durch die Skala konnte die auftretende Verformung visuell abgelesen und dokumentiert werden.

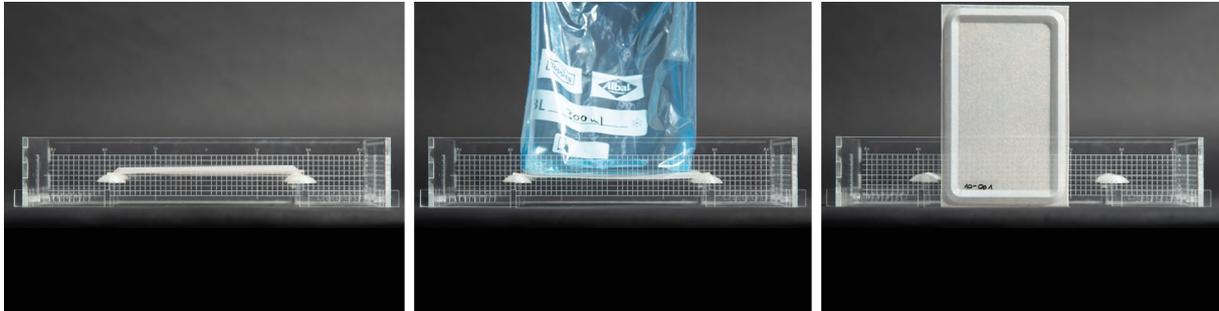


Abb. 47: Die Abbildungen zeigen einen Versuchskörper im Versuchsaufbau, mit Belastung durch 300ml Wasser und in der Übersicht.

1.2.2. Tiefzugversuche in Polycarbonat (2 und 4 mm Stärke)

Seitens des Industriepartner wurden Testkörper gefertigt und Folien mit 1 -2 mm Stärke tiefgezogen (Abb. 48).

Parallel dazu wurden durch die Firma mm plastik GmbH das Rohmaterial der Tiefziehformen für das MS Wissenschaft-Exponat bearbeitet (Abb. 49). Anschließend wurden die 2 mm Polycarbonatfolien über diese Formen gezogen (Abb. 49 beispielhaft).

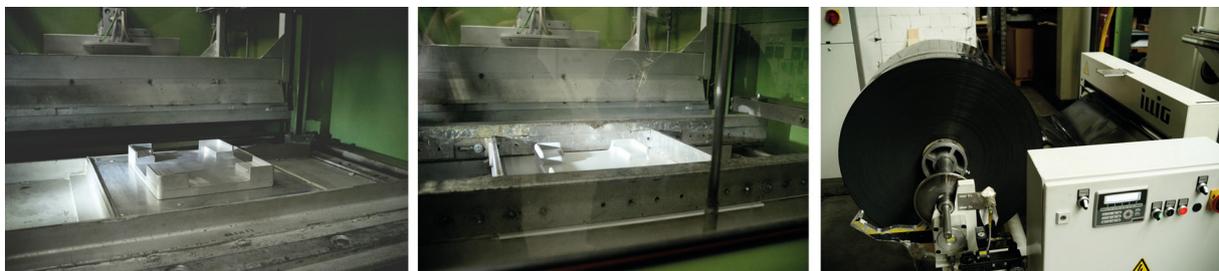


Abb. 48: Exemplarische Tiefzugform aus Aluminium für die Serienproduktion; Tiefgezogene Folie in Serienfertigung; Folie für das Tiefziehen auf Rolle zur Serienproduktion

Formenbau:



Abb. 49: Rohmaterial V4417 zum Formenbau; Rohmaterial in der Fräse beim Zerspannungsvorgang; Fertige Tiefzugform (links)

1.2.3. Ergänzender Biegezug-Versuch zur statischen Evaluation

Für die Evaluation der statischen Leistungsfähigkeit wurde das Biegezug-Verfahren gewählt. Nach der Phase der orientierenden Entwürfe in AP 1 bestand durch die Einladung der MS Wissenschaft die Möglichkeit, einen großformatigen Prototyp zu bauen. Nach Beendigung der Ausstellung wurde dieser im Labor auf seine Durchbiegung unter Last getestet. Das Bild zeigt den Aufbau des Biegezug-Versuchs (Abb. 50), bei dem ein Stempel in einer gegebenen Zeit über eine Strecke verfährt und den aufzubringenden Druck protokolliert.

Die in der Fassade und damit auf dem Versuchskörper in der Realität auftretenden Kräfte wären vornehmlich Windkräfte. Diese wirken in der Fläche, d. h. für eine akkurate Belastung müsste die gleiche Kraft in gleicher Richtung wirkend, auf allen Flächen gleichzeitig anliegen.

Dies war mit dem dargestellten Aufbau nicht möglich, weswegen die Last abstrahiert werden musste. Hierfür wurde die mittig liegende Hauptfläche des Versuchskörpers als die Fläche mit dem höchsten Lasteintrag identifiziert.

Anschließend wurde ein Druckstempel aus zwei Lagen 10 mm starker Acrylglasplatten gefertigt. Der Druckstempel überragte in seinen Dimensionen die gewählte Fläche um etwa 2 %, sodass er trotz des Anstellwinkels der Fläche passgenau auf derselben platziert werden konnte. Hierfür wurde der Druckstempel an einer Kugelkopf-Halterung der Biegezug-Maschine befestigt. Dadurch war es möglich, den Stempel derart zu kippen, dass er parallel zur gewählten Fläche des Versuchskörpers stand.

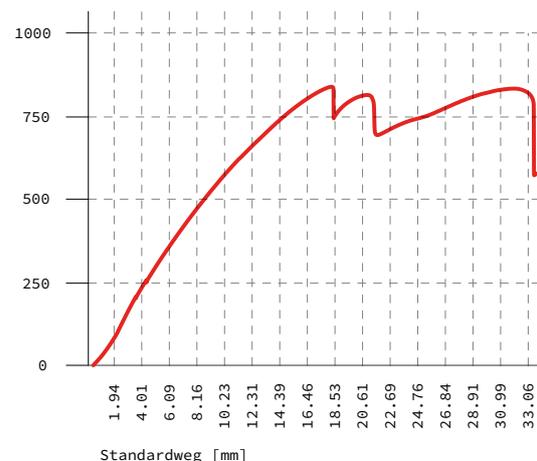
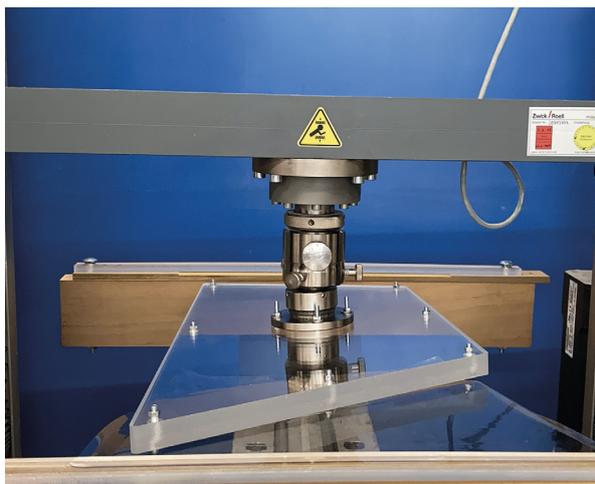


Abb. 50: (links) Versuchskörper in der Biegezugmaschine mit angepasstem Druckstempel

Abb. 51: (rechts) Die Grafik zeigt den Verlauf der auf den Versuchskörper einwirkenden Kräfte anhand des gefahrenen Wegs(X-Achse) und der aufgetragenen Kraft (Y-Achse)

Abbildung 51 verdeutlicht das Resultat des Biegezug-Versuchs. Der Versuchskörper gibt bei 840 N das erste Mal nach. Im Versuch ist dies optisch gut anhand von Knicken zu erkennen. Im weiteren Verlauf erreicht die Auflagerkraft noch einmal 815 N und 834 N, wonach sie deutlich abfällt. Das Bild zeigt deutlich die Verformung des Versuchskörpers.

1.3. Arbeitspaket 3: Modellierung und Simulation sowie erweiterte Geometrieversuche

1.3.1. Festlegung Grundlagengeometrie für weitere Bearbeitung

Basierend auf den vorangegangenen Analysen und Auswertung durch Matrizen und Simulationen wurden zwei Geometrieconzepte ausgewählt. Ein abgeflachter Pyramidenstumpf, sowie eine Form mit mehreren einfach gekrümmten Flächen (Abb. 52).

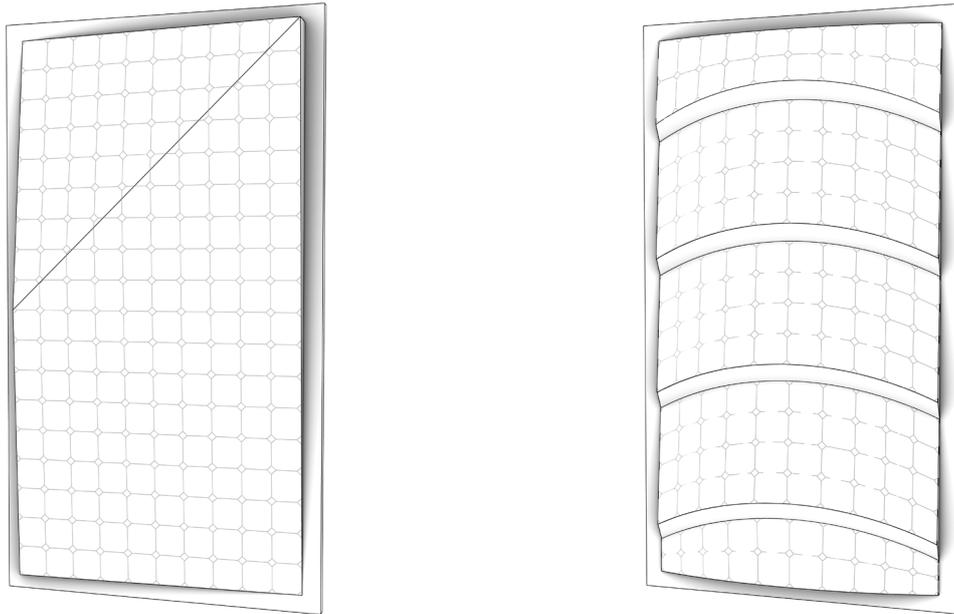


Abb. 52: (links) Die ausgewählte prototypische, planare Form, (rechts) Form mit einfach gekrümmten Flächen

1.3.2. Ergänzender Ansatz für die Simulation nach der linearen Beultheorie

Um den beschriebenen Versagensfall in der Simulation abbilden zu können, wurden zwei unterschiedliche Ansätze untersucht:

- a) Ermittlung maximaler Feldgrößen nach der linearen Beultheorie
- b) Vereinfachte FEM-Simulation (siehe 1.3.4).

Bei allen untersuchten Geometrien müssen die ebenen Feldbereiche zwischen den aussteifenden Falten⁹, Rippen¹⁰ und Sicken¹¹ Druckkräfte aufnehmen. Das Beulen der Platten muss für das Tragverhalten berücksichtigt werden und ist maßgebend für die Tragfähigkeit.

(9)

Falte von Faltenwerk, wobei zwei Scheiben über eine Kante kraftschlüssig verbunden werden (vgl. Wikipedia, „Faltenwerk“, 2023). Falte beschreibt in diesem Fall einen linearen Knick zwischen zwei Platten, die nicht in einer Ebene laufen.

(10)

Rippen beschreibt trapezförmige, unterzugartige Elemente in einer Platte.

(11)

Ähnlich den Rippen ist eine Sicke ein versteifendes Element in einer Platte, jedoch sind die Sicken in ihrer Ausgestaltung vielfältiger (vgl. 1.1.8. Stand der Technik Sickenausbildung)

Als Berechnungsmethodik wurde als Ansatz versucht, die lineare Beultheorie (Petersen 1992) vom Werkstoff Metall auf den Werkstoff Kunststoff anzuwenden. Ursprünglich für die Bemessung von Blechen ausgelegt, erlaubt diese Methode die maximale Feldgröße, bei der kein Beulen unter Last X auftritt, in Relation zur Materialstärke rechnerisch zu ermitteln. Als Annahme dient ein Einzelfeld mit frei drehbar gelagerten Rändern und einachsigen, konstantem Druck.

Der erhoffte Vorteil liegt in der kurzen Berechnungszeit, da die maximale Feldgröße in Abhängigkeit zur Materialstärke über Tabellen ermittelt werden kann (Abb. 53).

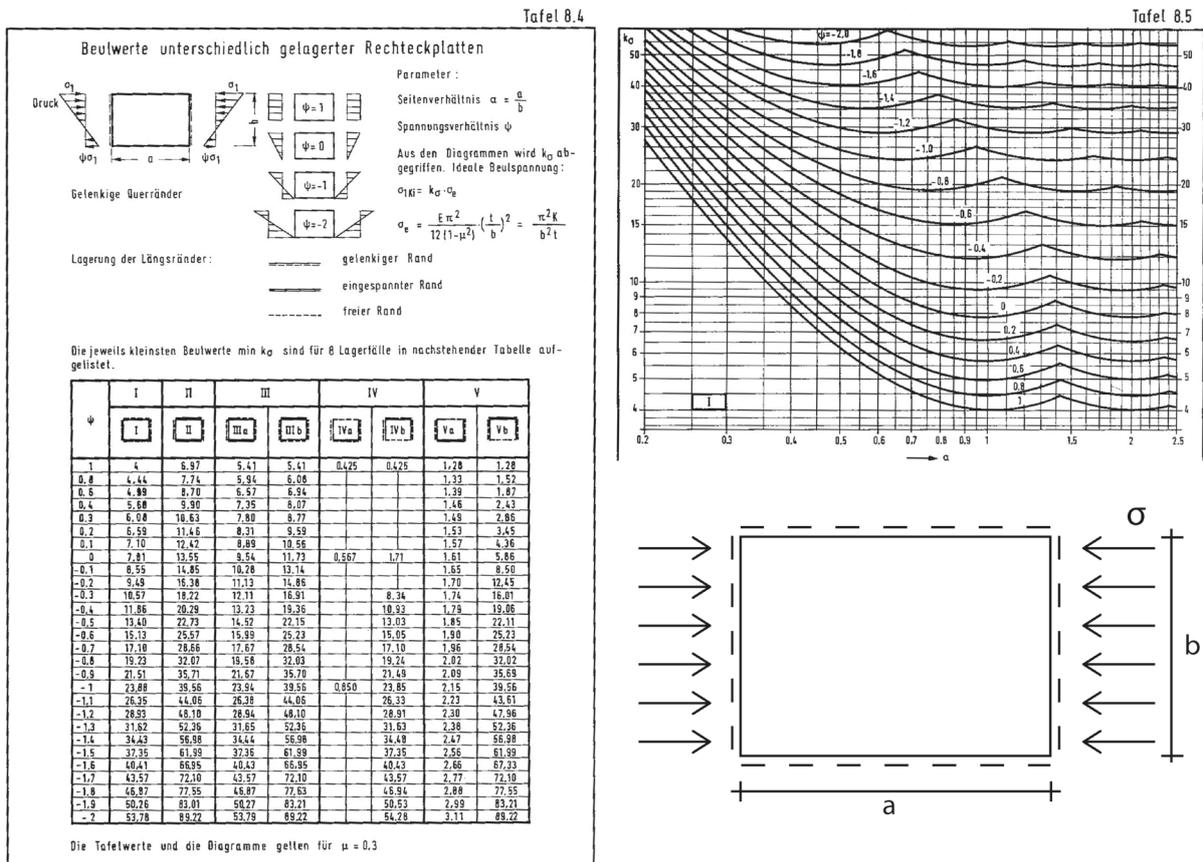


Abb. 53: Tabellen zur Bauteildimensionierung (Petersen 1982)

Ein Nachweis nach der linearen Beultheorie gibt einen sehr konservativen Grenzwert vor, der die überkritischen Tragreserven vernachlässigt. Folgend findet sich eine beispielhafte Berechnung für eine 3 mm starke Folie.

$$\sigma_e = \frac{E \cdot \pi^2}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \qquad \sigma_{ki} = k_{\sigma} \cdot \sigma_e$$

Materialkennwerte:

- E= 235 kN/cm²
- t = 3 mm
- fc= 8,6 kN/cm²
- u: Annahme thermoplastischer Kunststoff 0,35

Aus den Tabellen ergibt sich ein Seitenverhältnis von $a/b = 1$ und einachsigen konstantem Druck $k_\sigma = 4$.

Daraus resultiert eine maximalen Feldbreite von 3,0 cm, wenn die Materialfestigkeit gegenüber einer idealen Beulspannung maßgebend sein soll.

Die Beultheorie geht davon aus, dass das Material zuerst bricht, bevor es knickt. Die Festigkeit und das E-Modul gehen linear in die Berechnung ein. Da das E-Modul von Stahl um den Faktor 100 größer als das von Kunststoff ist, ergeben sich hier unbrauchbare Werte für das Material Polycarbonat.

Daher sollten die kritischen, materialspezifischen Tragreserven in die weiteren Untersuchungen einbezogen werden, um eine signifikante Materialeinsparung in der Simulation abbilden zu können. Deshalb wird im Weiteren eine rechen intensivere Finite-Elemente-Modellierung (FEM) verfolgt, die deutlich materialeffizientere Simulationsergebnisse ermöglicht.

1.3.3. Grundlegende Annahmen für eine vereinfachte und schnelle FEM-Simulation

Mittels Finite-Element-Analysen (FEM) können die überkritischen Tragreserven und somit die Tragfähigkeiten und kritischen Grenzlaster von knickgefährdeten Bauteilen bestimmt werden.

Hierfür ist neben der Berechnung nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung von Imperfektionen die Ermittlung der kritischen Lastfaktoren ein wichtiger Indikator (Abb. 54). Aufgrund der hohen Anzahl an Formvarianten, die im Laufe des AP 1 entstanden sind, ist eine schnelle FEM-Simulation notwendig, um eine grundlegende und differenzierte Beurteilung von verschiedenen Bauteilgeometrien zu ermöglichen. In unserem Fall liegt keine perfekte Schalentragwirkung vor und Biegebeanspruchungen dominieren in allen bisher untersuchten Geometrievarianten. Daraus resultiert, dass Imperfektionen, die einen erheblichen zusätzlichen Modellieraufwand darstellen, nur eine untergeordnete Rolle spielen und somit entfallen können.

Der kritische Lastfaktor (unter Berücksichtigung von Imperfektionen) muss trotzdem mindestens die Effekte aus Lastunsicherheit (Lastsicherheitsfaktor) und Materialunsicherheit abdecken.

Daher wird für den Nachweis eine vereinfachte Geometrie ohne Imperfektionen untersucht und die Auslastung auf 66,6 % der Tragfähigkeit der Bauteile durch Minderung des E-Moduls reduziert. Durch Reck und Stauchung des Polycarbonats bei der Umformung ist geometriebedingt bei der seriellen Fertigung von einer hohen Streuung auszugehen. Daher wird für γ_M ein abgemindertes E-Modul von $\gamma_M = 1,5$ angenommen. Zum Vergleich: Stahl = $\gamma_M 1,1$ / Beton $\gamma_M = 1,4$

$$\eta_{ki} > 1 \times \text{Materialsicherheitsfaktor} \times \text{Lastsicherheitsfaktor} = 1 \times 1,5 \times 1,5 = 2,25$$

$$\eta_{ki} > 1,5 \times \text{Materialsicherheitsfaktor} \times \text{Lastsicherheitsfaktor} = 3,375$$

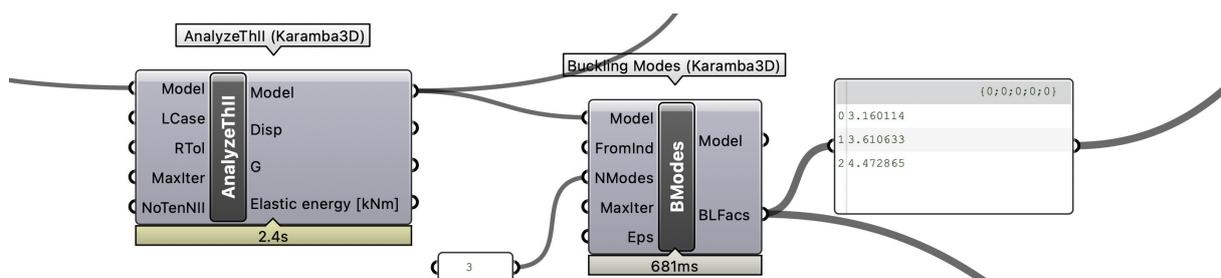


Abb. 54: Überprüfung der Spannungswerte mit Sicherheitsfaktor zur Ermittlung des Versagenfalls. Um lokale Spannungsspitzen auszuschließen wird die Eigenschwingung (Buckling Mode) des Bauteils auf Kongruenz mit der Globalverformung überprüft.

Zusammenfassend dient die Verformung der Bauteile als Richtwert für den Vergleich einzelner Bauteilgeometrien untereinander. Der Auslastungsfaktor muss dabei < 1 sein, um den Versagensfall der Großform ausschließen zu können. Über den Nachweis der Spannungsgrenze (Abb. 55) kann ausgeschlossen werden, dass das Material plastisch wird (i.e. nicht fließt).

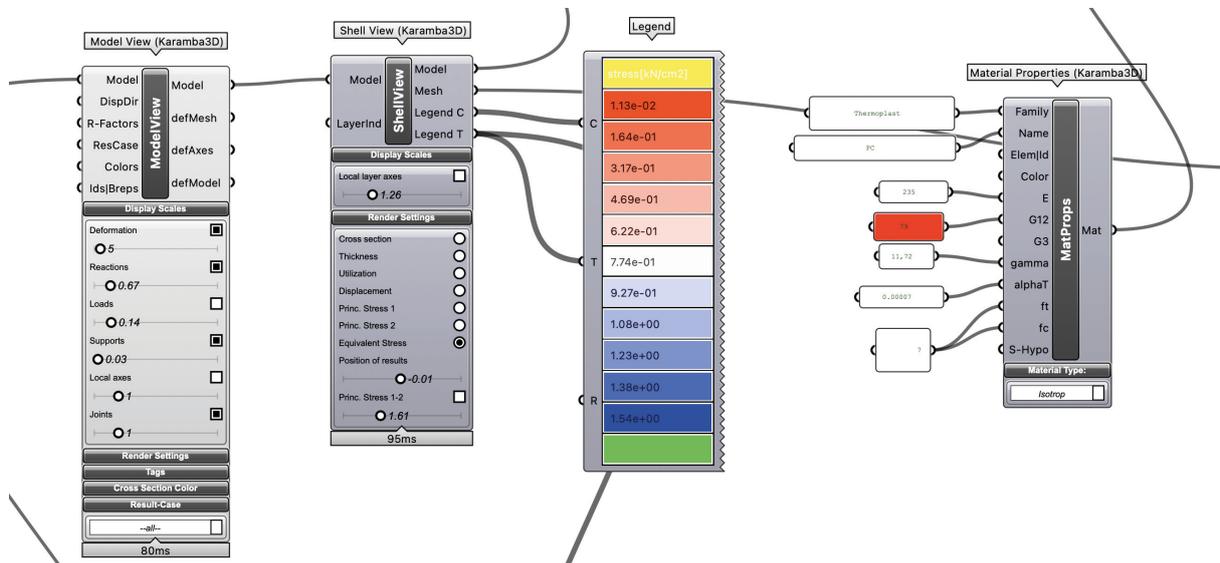


Abb. 55: Nachweis der Spannungsgrenze, um auszuschließen, dass das Material 'fließt'.

Als Grundgeometrie wurde eine planare Fläche mit den Außenmaßen 1600×800 mm verwendet. Das entspricht der größten im Vorfeld festgelegten drei Abmessungen für Fassadenpaneele. Alle dreidimensional umgeformten Geometrien wurden auf diese Grundflächenmaße angepasst.

1.3.4. Materialkennwerte für die statische Simulation

Für die statische Simulation wurden für das Material Polycarbonat-Folien folgende Kennwerte angenommen. Diese basieren auf den vom Industriepartner Isik verwendeten Polycarbonatfolien.

- E / Youngs-Modulus [kN/cm²] - 235
- G12 / In Plane Shear Modulus [kN/cm²] – 79 -> 87
- G3 / Transverse Shear Modulus [kN/cm²] -
- Gamma / Specific Weight [kN/m³] – 11,72
- AlphaT / Specific Weight [1/C°] – 7 x 10-5
- ft / Tensile Strength [kN/cm²] - 7
- fc / Compressive Strength [kN/cm²] – 8,6

1.3.5. Anwendung der entwickelten Werkzeuge in einer parametrischen Modelliersumgebung

Die Karamba3D© Definition für die FEM-Simulation wurde so konzipiert, dass es mit wenig Rechenzeit verlässlich eine differenzierte Betrachtung von Ergebnissen untereinander möglich ist. Dadurch konnten in kurzer Zeit vergleichende Matrizen mit Daten befüllt werden.

Um die Auswirkungen verschiedener Parameter auf die zuvor ausgewählte Basisgeometrie zu beurteilen, wurden zuerst Varianten generiert, die sich durch die statische Höhe der Deckfläche und die Anstellwinkel der Seitenflächen unterscheiden (Abb. 56).

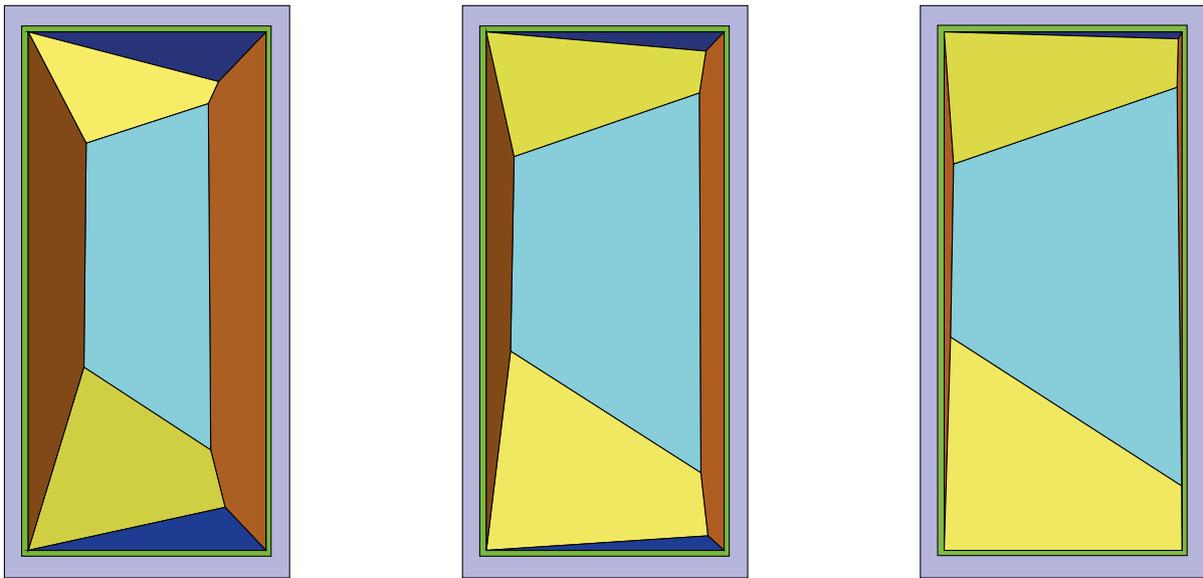


Abb. 56: Farbcodierung unterschiedlicher Anstellwinkel und Deckflächenhöhen

Bereits bei den Geometrievarianten in 1.1.13 entscheiden Höhe und Anstellwinkel über die Steifigkeit der Form. So gibt es einen präferierten Bereich des Anstellwinkels sowie eine untere Gesamthöhe. Dies ist gut in der Tabelle Abbildung 57 ablesbar.

Anstellwinkel (Grad)	Deckflächenhöhe 100mm	Kollabiert	Deckflächenhöhe 200mm	Kollabiert	Deckflächenhöhe 400mm	Kollabiert
10	31,10	ja	2,96		1,64	
20	2,07	ja	1,82		0,59	
30	97,90	ja	1,03		0,84	
40	3,17		1,24		1,52	

Abb. 57: Tabelle Materialkennwerte

Die Auswertung zeigt die Anstellwinkel der Seitenfläche, die Höhe der Deckfläche sowie den Versagensfall in Bezug zu den angenommenen Materialkennwerten. Die beiden rot unterlegten Werte basieren auf einem Fehler in der Simulation.

Je höher der Anstellwinkel und die Gesamtform sind, desto besser ist die Performanz. Bei großer Höhe verändert sich dies ins Gegenteil, sodass sich letztlich ein idealer Wertebereich zwischen 200 und 400 mm Formhöhe und einem Anstellwinkel von 20 bis 30 Grad ergibt.

Die hohen Formen wurden in der Auswertung negativ bewertet, da sich durch die extreme Verkleinerung der Deckflächen sowohl Gestaltungs- als auch Einschränkungen für die solare Ausbeute ergeben (Abb. 58).

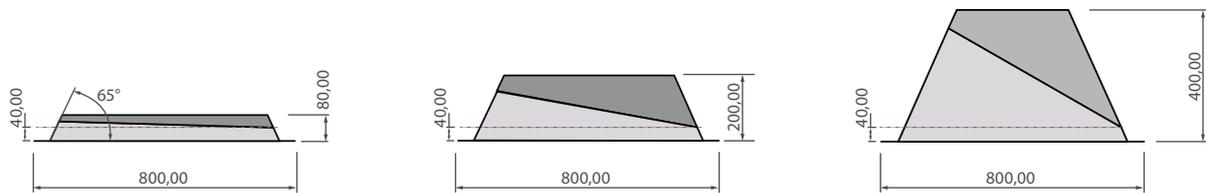


Abb. 58: Unterschiedlichen Bauteilhöhen in der Ansicht

1.3.6. Ergänzende Umsetzung eines vereinfachten Planungswerkzeugs und Prototypenbau im Rahmen der Ausstellung MS Wissenschaft

Ein vereinfachtes Planungswerkzeug, entwickelt für die Ausstellung auf der *MS Wissenschaft* (Vorgriff auf 1.3.10) ermöglicht eine hohe Anzahl variierender Geometrie in kurzer Zeit mithilfe von wenigen Parametern zu generieren (Abb. 59). Im Anschluss erfolgt direkt eine Solaranalyse, die um eine FEM-Simulation ergänzt werden kann.

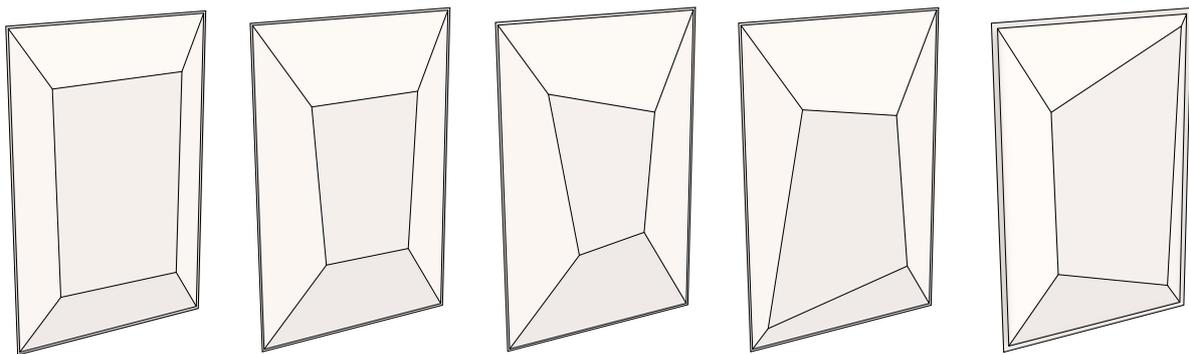


Abb. 59: Form 01 – 05. v.l.n.r. sind verschiedene Variationen im gleichen Parameterraum zu sehen. Ganz rechts ist die Form zu sehen, die als Demonstrator gefertigt wurde.

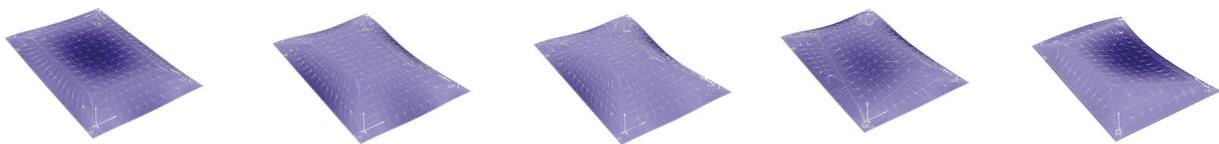
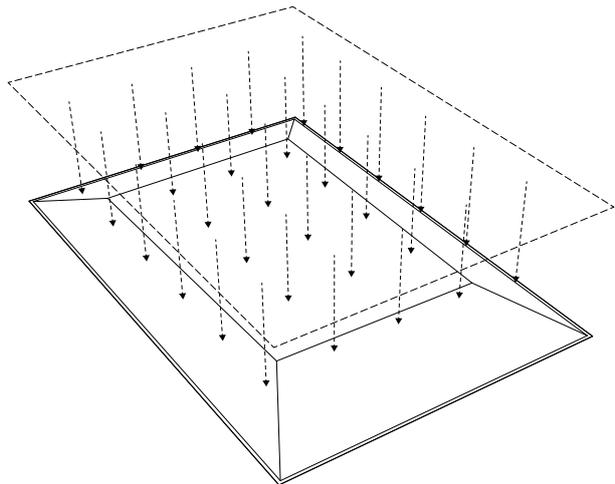


Abb. 60: FEM-Simulation 01 – 05. v.l.n.r. sind die äquivalenten FEM-Simulationsergebnisse zur obigen Formstudienreihe zu sehen

Durch die FEM-Analyse wird ersichtlich, in welchen Feldbereichen sich Verformungen ergeben (Abb. 69). Ein Vergleich der statischen Performanz unterschiedlicher Paneelgeometrien erfolgt über den Wert der Durchbiegung. Dadurch können die unterschiedlichen Geometrievarianten relativ untereinander verglichen werden. Folgende Rahmenbedingungen wurden für die Simulation zugrunde gelegt:

Die Lastverteilung entspricht einer Flächenlast (Abb. 61), d. h. jeder Punkt der Grundfläche der Geometrie wird belastet.



Lastfall 1: Eigengewicht

Lastfall 2: Flächenlast 500 N/m² Materialstärke: 4 mm

Abb. 61: Zu sehen ist die Flächenlast, die auf eine Beispielgeometrie wirkt

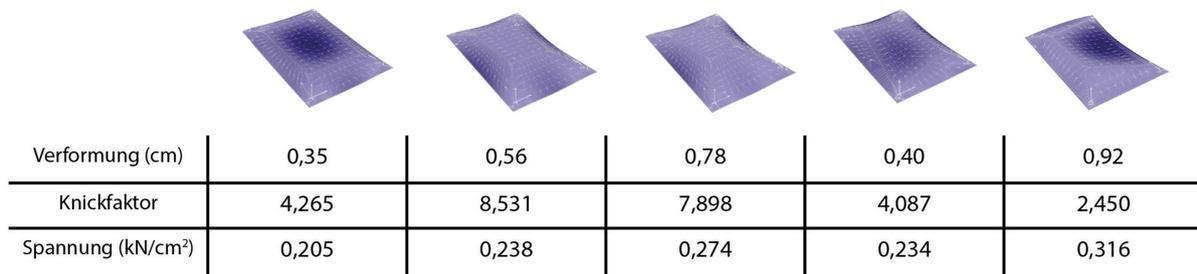
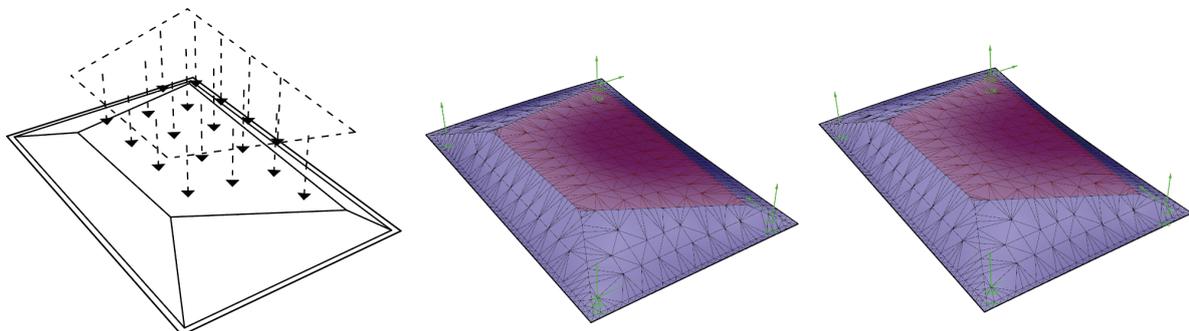


Abb. 62: FEM-Simulation 01 – 05. v.l.n.r sind die äquivalenten FEM-Simulationsergebnisse zur obigen Formstudienreihe zu sehen

Durch Modifizieren der ursprünglichen Simulationskonfiguration im Abgleich zum Biegezug-Versuch mit der tatsächlich tiefgezogenen Form kann abgeglichen werden, wie genau die Ergebnisse der Simulation sind (Abb. 62).

Um den physikalischen Versuch zu simulieren, wurde die Flächenlast von der gesamten Grundfläche auf die tatsächliche Größe des Druckstempels im Versuch verkleinert.

Die Materialstärke wurde auf 2 mm eingestellt, der Lastfall 2 auf 800 N/m² erhöht (Abb. 63).



Verformung (cm)	0,73	1,23
Knickfaktor	2,150	0,656
Spannung (kN/cm ²)	0,219	0,371

Abb. 63: Die Tabelle zeigt das Panel mit Krafteinwirkung, Flächenlast 800 N/mm² auf der Frontseite des Testkörpers (links) die nicht zum Kollabieren führt (mitte) und einmal mit der doppelten Last (rechts).

1.3.7.1. Integration der solaren Simulation in die digitale Prozesskette

Für die Simulation der solaren Globalstrahlung wurden ausschließlich planare Flächen für die Integration der OPV angenommen. Dies umgeht etwaige Komplikationen bei der Einbringung in Formen, welche z. B. zweisinnig gekrümmte Flächen beinhalten.

Für die Simulation der solaren Strahlung wurde das Plug-in „Ladybug“ (Mostapha, Pak 2013) für Rhinoceros3D© eingesetzt. Die solare Analyse mit Ladybug kann nahtlos in das gleiche Software-Ökosystem wie das Plug-in Karamba3D© (FEM-Analyse) integriert werden.

Dies ermöglicht im späteren Verlauf die Optimierung von Duchbiegung und solarem Ertrag mit Hilfe von Multi-Objective-Optimization (MOO). Das Plug-in Ladybug fällt unter die Kategorie der „built environmental modeling tools“ und bietet verschiedene Werkzeuge, um das Auftreffen von diffuser und direkter solarer Strahlung und damit den Energieertrag für die OPV-Flächen der Sun Skins Paneele zu analysieren. Mithilfe der Wetterdaten eines Standortes können dabei präzise Aussagen für die solare Performanz einer Geometrie getroffen werden.

Erstmalig auf die generierte Form angewandt wurde die Solaranalyse im Rahmen des *MS Wissenschaft* Demonstrators. Die in Kapitel 1.3.6 gezeigte mögliche Geometrie kann in der Simulation mit bis zu vier, an verschiedenen Positionen platzierten OPV-Modulen versehen werden, um anschließend die solaren Kennwerte für diese zu ermitteln (Abb. 64).

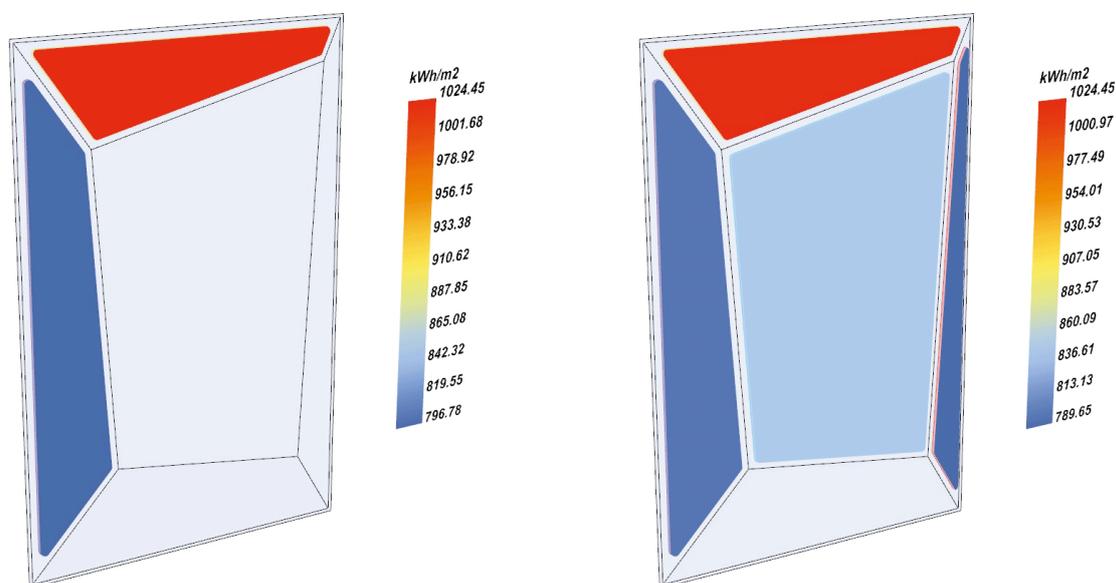


Abb. 64: Die Abbildungen zeigen zwei Paneele. Einmal mit zwei (links) und einmal mit vier (rechts) Solarmodulen ausgestattet. Das Paneel ist nach Süden ausgerichtet, der errechnete Wert ist für den Standort Frankfurt/Main ermittelt worden.

1.3.7.2. Teilautomatisierte Geometrierzeugung, solare Simulation und qualitative Bewertung

Für den Projektbeitrag zur Ausstellung auf der *MS Wissenschaft* wurde für die vornehmlich jüngeren Besuchenden ein interaktives Konzept umgesetzt, bei dem Eigenschaften eines vereinfachten Sun Skins Paneel über physische Bedienelemente geändert werden konnte. (Abb. 86). Dafür wurde ein Planungswerkzeug erstellt, das mittels ausgewählter Parameter Geometrie generiert. Durch eine intelligente Festlegung des Parameterraums kann eine Vielzahl unterschiedlicher Formen erzeugt werden, die auf der gleichen Grundgeometrie basieren und eine präzise Aussage über die solaren Kennwerte der Geometrien erlauben (Abb. 65). Die Entwürfe der Besucher wurden zu einer größeren, virtuellen Fassade zusammengefügt, um die Gestaltungsvarianz zu verdeutlichen.

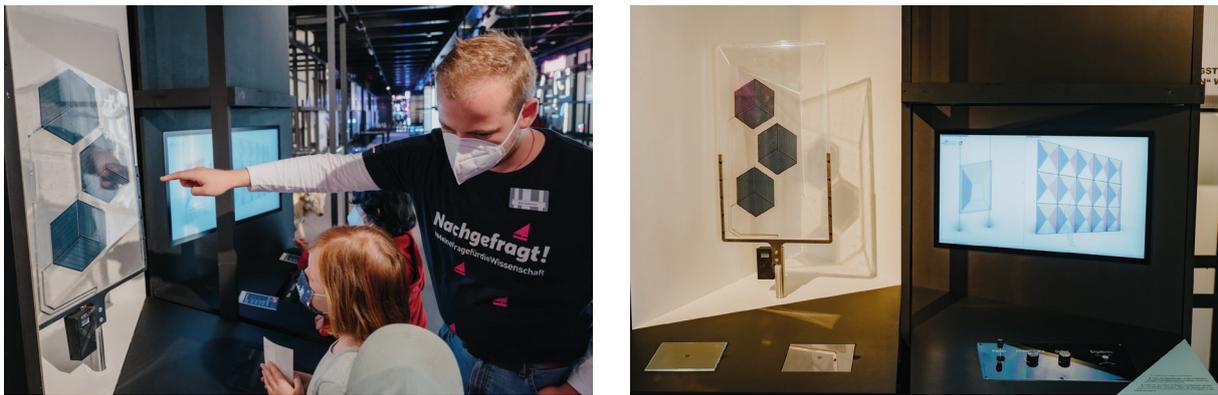


Abb. 65: Demonstrator MS Wissenschaft. Links ist das Panel sowie zwei Materialproben zu sehen. Rechts die solare Simulation am Bildschirm sowie die Bedienelemente.

Als geometrische Grundlage des Tools dient ein Pyramidenstumpf, dessen Deckfläche durch Kippen um die zwei Hauptachsen modifiziert werden kann (Abb. 66). Damit wird ein großer Gestaltungsraum mit nur zwei Parametern erreicht. Zusätzlich wurde die Größe dieser Deckfläche als veränderbarer Parameter hinzugefügt.

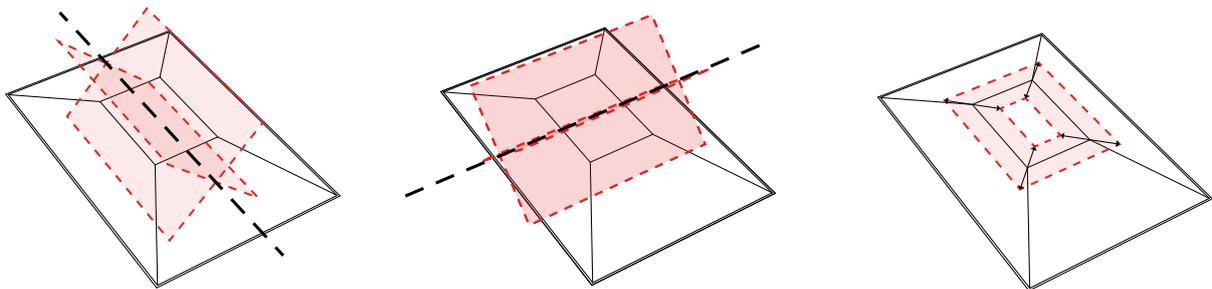


Abb. 66: Kippen der Deckfläche um die Längsachse(links), Querachse(mittig) und vergrößern bzw. verkleinern der Deckfläche(rechts)

Ein weiterer Parameter ermöglicht es dem Nutzer, eine bestimmte Anzahl der fünf Flächen des Paneels (Wertebereich 1–5) als solar aktiv zu definieren. Der Nutzer kann diese vier Parameter intuitiv durch zwei Arten von Bedienelementen steuern und seine generierte Form abschließend auf ihre solare Performanz überprüfen.

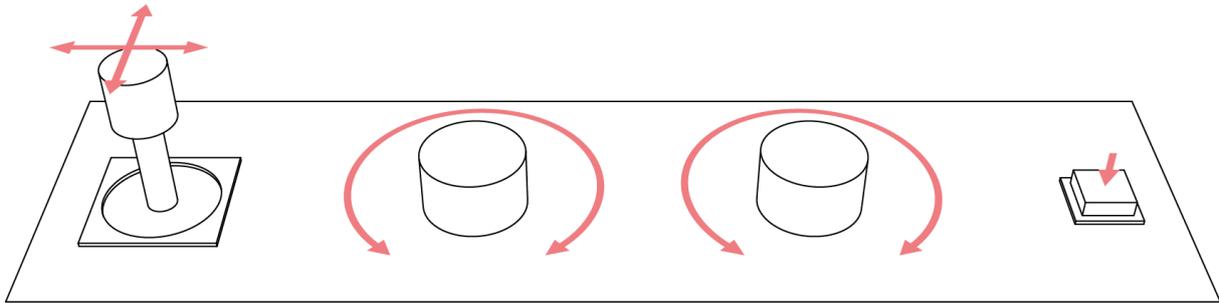


Abb. 67: Joystick (Neigung der Schnittebene), Drehregler links (Größe der Frontfläche), Drehregler rechts (Anzahl der solaren Flächen), Knopf = Start der solaren Simulation

Der Joystick bedient dabei über die X/Y-Achsen beide Kippachsen, während der linke Drehregler die Größe der Deckfläche einstellt. Der rechte Drehregler bestimmt die Anzahl der solaraktiven Flächen.

Der Druckknopf führt die solare Analyse aus. Die Simulation benötigt Rechenzeit und wird daher erst bei Bedarf nach Erzeugung der Geometrie aktiviert (Abb. 67).

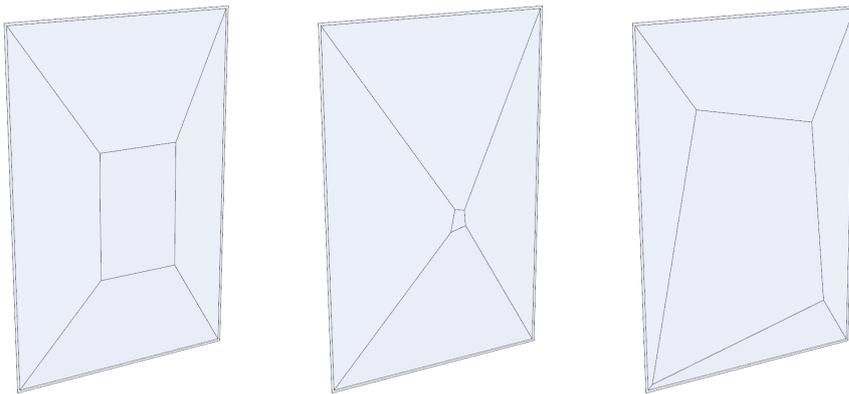


Abb. 68: Ausgangsposition in Mittelstellung (links), Variation mit kleiner (mittig) und großer Deckfläche (rechts). +

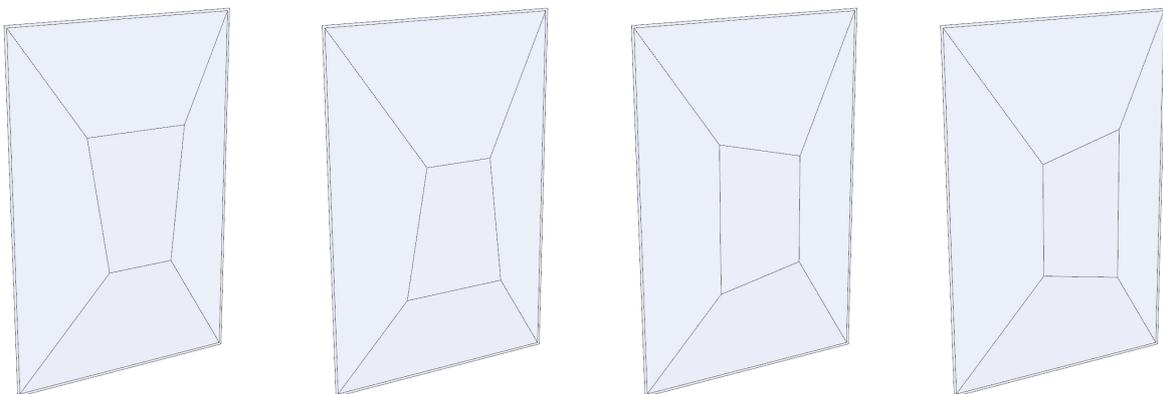


Abb. 69: Unterschiedliche Einstellungen der Achsen bei mittlerer Deckflächengröße.

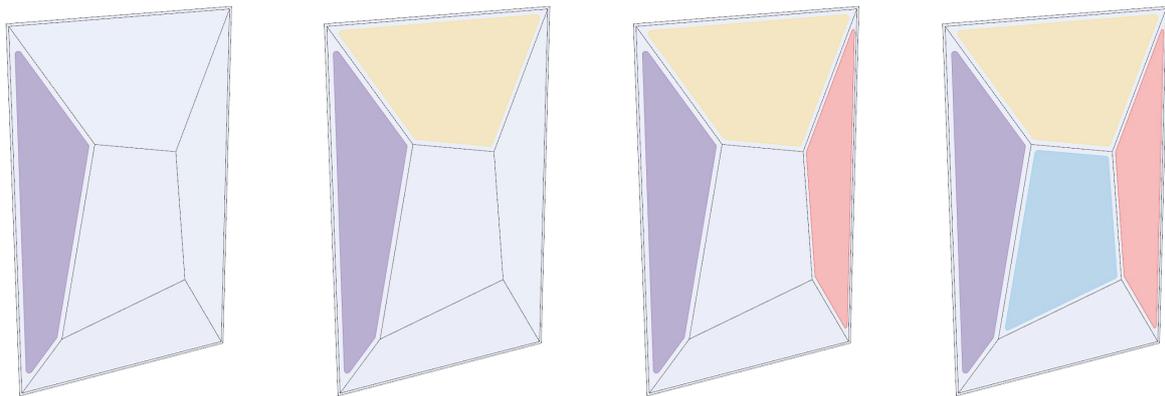


Abb. 70: Mögliche Menge an solaraktiver Fläche

Die in diesem Parameterraum erzeugten Geometrien (Abb. 68-70) werden durch betätigen des Druckknopfs in einer exemplarischen Fassade gesammelt. Dadurch wird den Besuchern zum einen das Potential des Tools in seiner Bandbreite präsentiert, als auch ein Vergleich mit den Entwürfen anderer Nutzer ermöglicht (Abb. 71).

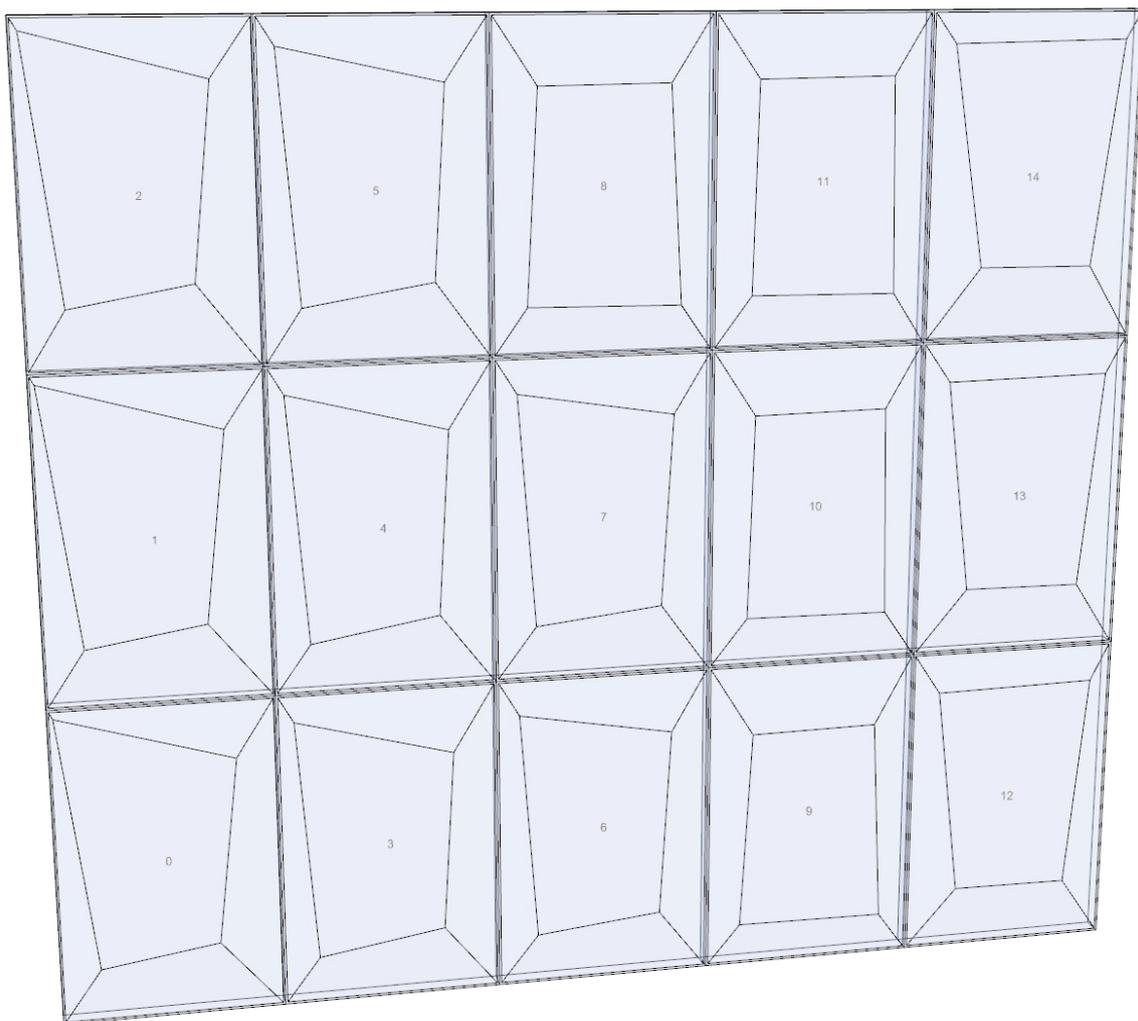


Abb. 71: In einer Prototypischen Fassade werden die erzeugten Geometrien aggregiert

1.3.8. Geometriebetrachtung im Detailmaßstab

Wir konnten in den vorangegangenen Abschnitten nachweisen, dass eine deutlich höhere Stabilität der Trägerfolien durch eine räumliche Aussteifung mittels Faltkanten erreicht werden kann. Das Tragprinzip des untersuchten Sun Skins Panels beruht auf einer idealisierten Bogentragwirkung entlang der zueinander gekippten Deckflächen (Abb. 72). Dabei sind zwei geometrische Fälle zu unterscheiden:

- a) symmetrische Bogengeometrie
- b) asymmetrische Bogengeometrie

Eine Ausbildung der Paneele als asymmetrische Bogengeometrie bietet einen deutlich größeren Gestaltungsspielraum. Dafür ist eine verminderte Tragwirkung durch größere, auszusteifende Deckflächen gegeben. Im nächsten Schritt wird daher untersucht, inwieweit sich die Materialeffizienz dieser Felder durch die lokale Ausbildung von Sicken zusätzlich verbessern lässt.

Die Abbildung 73 zeigt eine Serie von Regeldetails zur Sicken bzw. Faltenausbildung, die als Grundlage für die weitere Modellierung dienen.

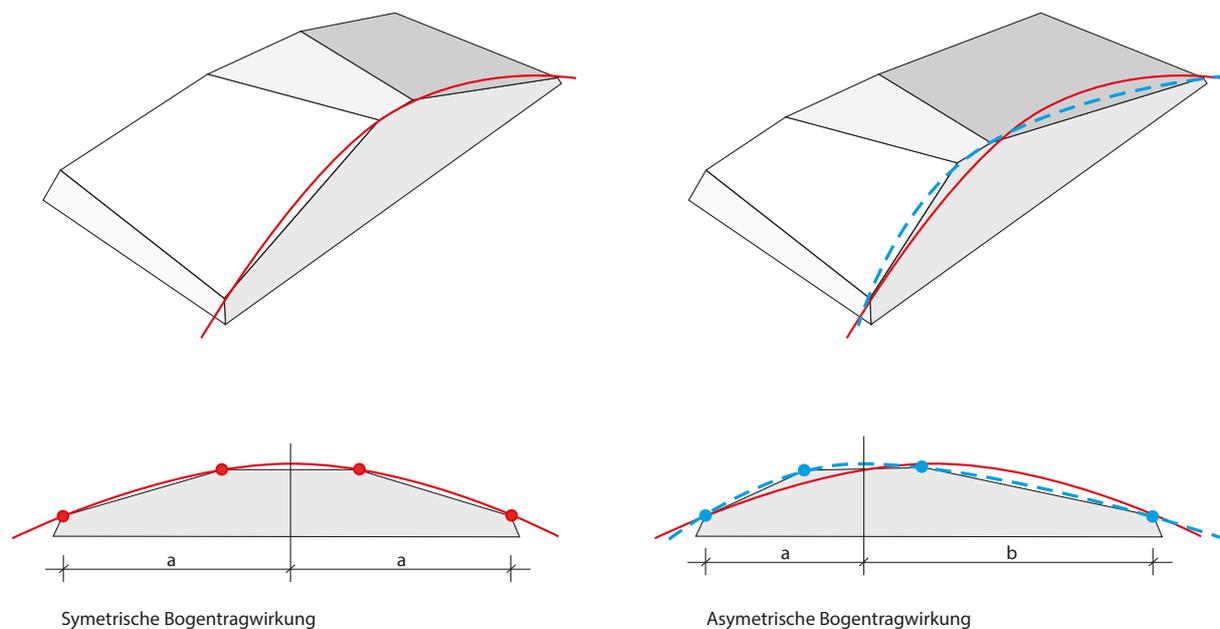
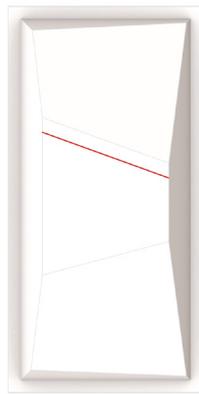
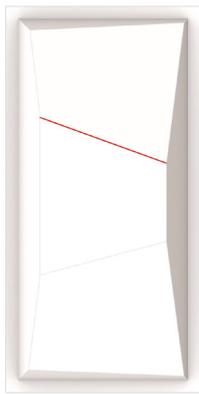


Abb. 72: Annahme Paneeltragwerk

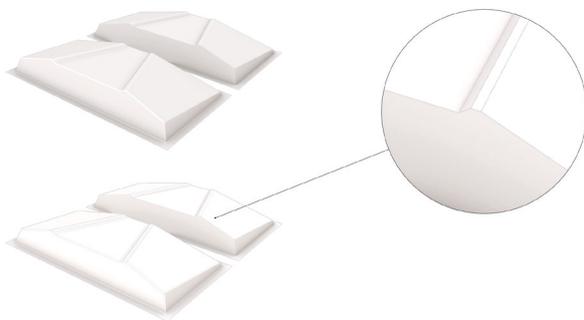
Anhand dieser Untersuchungen wurden Leitdetails zur Verbesserung der Paneelgeometrien erarbeitet und in einer Leitlinie zusammengefasst (Abb. 73-75). Diese Leitdetails wurden anhand der im Abschnitt 1.3.6 aufgesetzten Geometrie angewandt, um einen ersten Eindruck über mögliche Konsequenzen für die Gestaltung und Detaillierung zu erhalten. Zur Vereinfachung der OPV-Integration wurden die zusätzlichen Details nur in den Bereichen mit erhöhten statischen Anforderungen verortet.

Die Theorie geht davon aus, dass lange Kanten und Faltwinkel die angrenzenden Felder schwächen, während zusätzliche Sickenbildungen versteifend wirken.



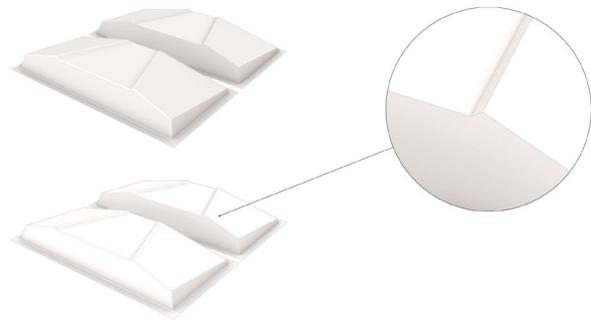
Leitdetails - Fall 1A

Aussteifung parallel zum Kantenverlauf > „weak side“



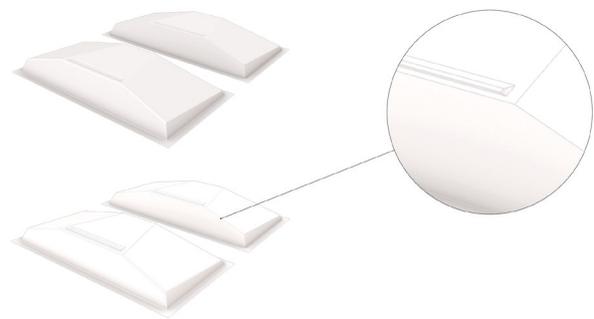
Leitdetails - Fall 1B

Aussteifung auf dem Kantenverlauf > „weak side“



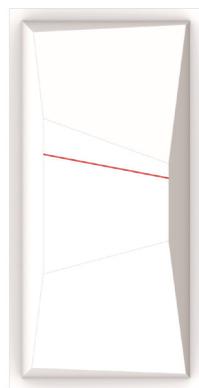
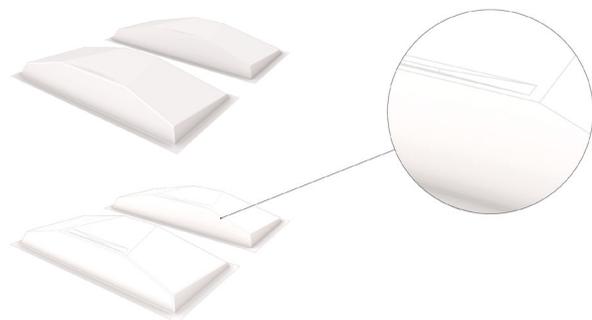
Leitdetails - Fall 1C

Aussteifung parallel zum Kantenverlauf, nicht auslaufend > „weak side“



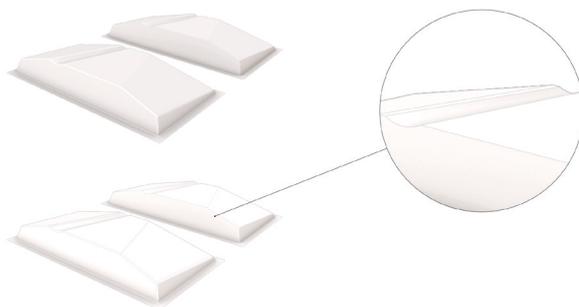
Leitdetails - Fall 1D

Aussteifung parallel zum Kantenverlauf, auslaufend > „weak side“



Leitdetails - Fall 2A

Aussteifung konisch zum Kantenverlauf, Halbrund-Querschnitt > „weak side“



Leitdetails - Fall 2B

Aussteifung konisch zum Kantenverlauf, Trapez-Querschnitt > „weak side“

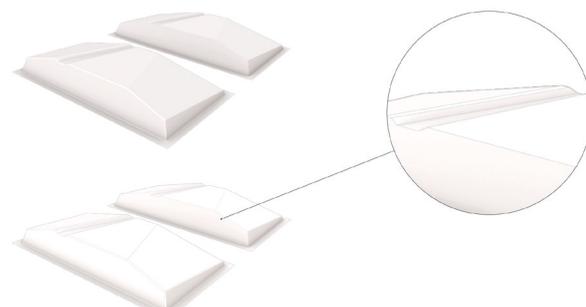
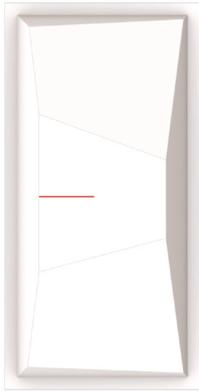
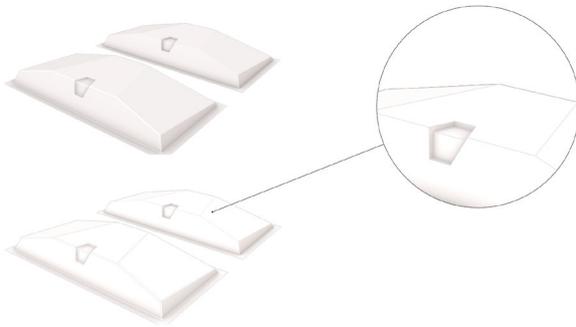


Abb. 73: Kategorisierung der verschiedenen zusätzlichen Versteifungen



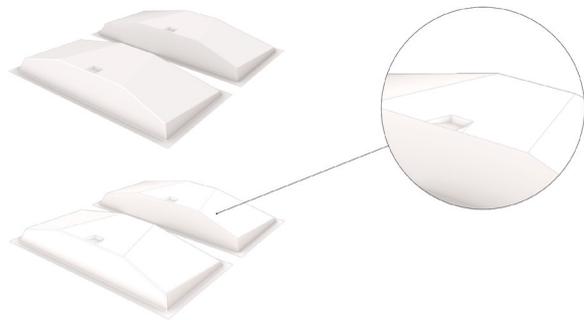
Leitdetails - Fall 3A

Aussteifung lotrecht über eine Kante > „weak side“



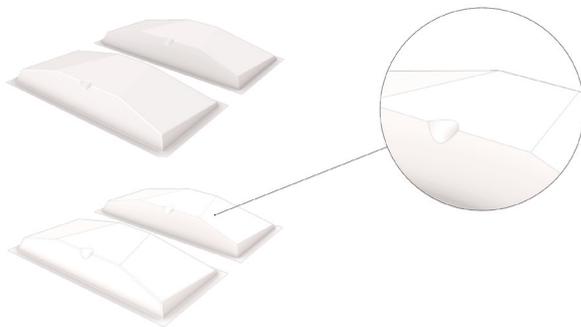
Leitdetails - Fall 3B

Aussteifung lotrecht zu einer Kante > „weak side“



Leitdetails - Fall 3C

Aussteifung lotrecht durch eine Kante > „weak side“



Leitdetails - Fall 3D

Aussteifung lotrecht durch einer Kante > „weak side“

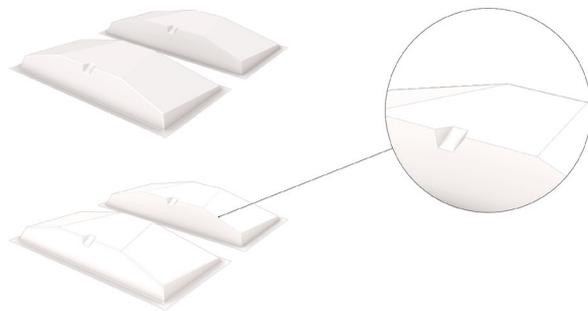


Abb. 74: Kategorisierung der verschiedenen zusätzlichen Versteifungen

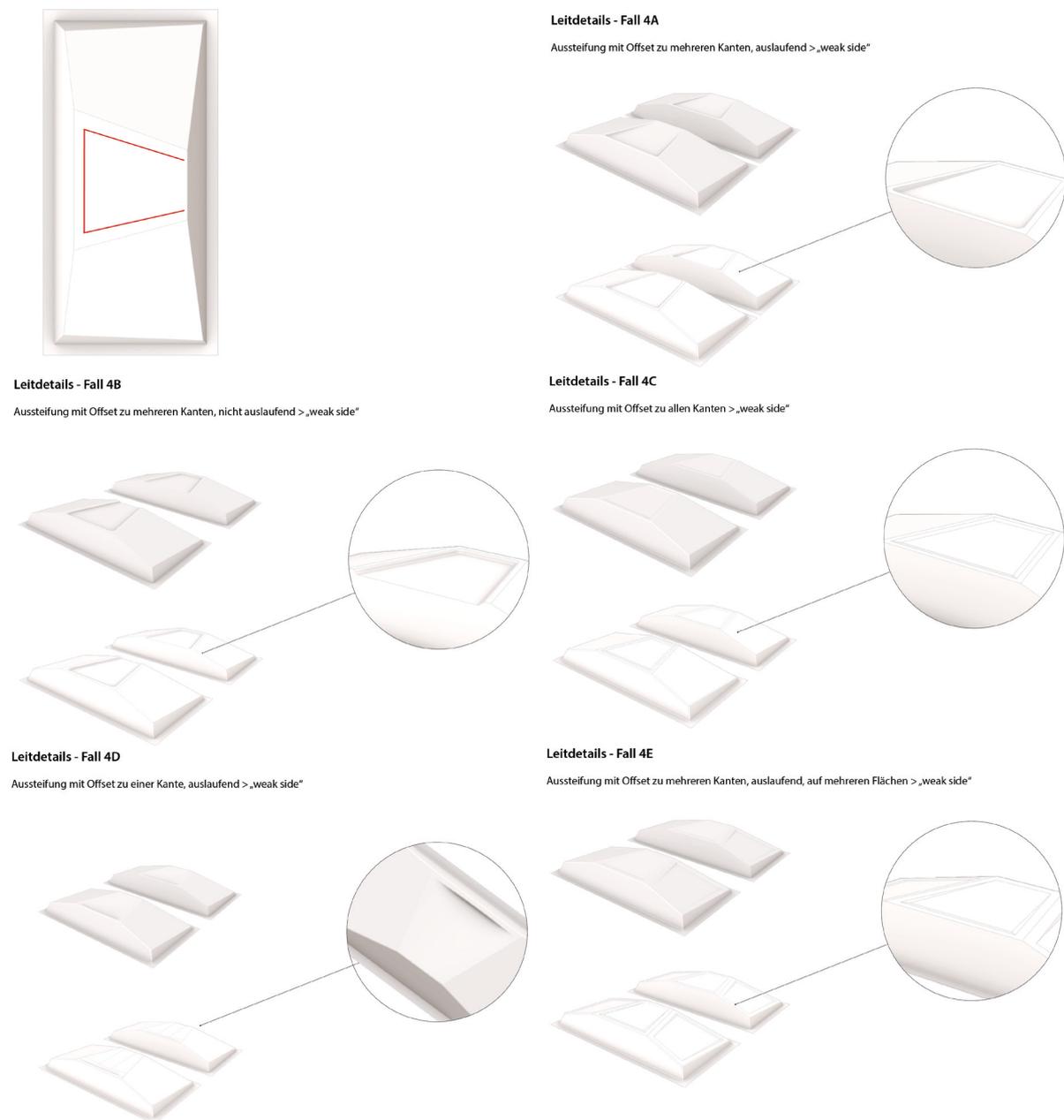


Abb. 75: Kategorisierung der verschiedenen zusätzlichen Versteifungen

Eine detaillierte 3D-Modellierung wurde für verschiedene Anwendungsfälle für die Grundgeometrie aufgesetzt. Die Variante B unterscheidet sich durch eine modellierte Verrundung – wie sie nach dem Tiefzugvorgang an allen Kanten auftritt (Abb. 76).

1.3.9. Ausblick: Statische RFEM Detailsimulation

Für die bisherige Simulation verschiedener dreidimensionaler Formen besteht ein hoher Abstraktionsgrad, um eine schnelle Simulation und eine vergleichende Bewertung verschiedener Globalformen mit niedrigem Detaillierungsgrad in der Entwurfsphase zu ermöglichen.

Dies wurde bewusst in Kauf genommen, um Aufwand und damit Zeit bei der 3D-Modellierung zu sparen und verlässlich auf eine parametrisch gesteuerte Geometrieerzeugung zurückgreifen zu können. Aufgrund der vorhergehenden Erkenntnisse zur unzureichenden lokalen Abbildgenauigkeit der FEM-Simulation in Karamba3D© und weiter greifender Detailarbeit durch die Erstellung von notwendigen Leitdetails (z. B. für die Fassadenintegration) wird deutlich, dass die Abbildungsgenauigkeit der vereinfachten Simulation nicht ausreicht. Um eine Bewertung der Form mit zusätzlicher Detailausbildung (Sicken, Verrundungen) vorzunehmen, ist es notwendig, die Ausbildung und Detaillierung von Sicken und Faltungen lokal mit einem hohen Detaillierungsgrad zu modellieren und zu simulieren, mit dem Ziel Formen, die gute statische Ergebnisse liefern, zusätzlich zu optimieren.

Um den Wirkungsgrad von zusätzlichen Sicken zu bewerten, wird anhand einer Auswahl der besten Geometrievarianten eine Simulation mit einem FEM-Programm erstellt, das die benötigte Abbildgenauigkeit liefert. Dafür wird im weiteren Verlauf RFEM© von Dlubal eingesetzt. Als Basis für die statischen RFEM© Simulationen werden die bereits im AP 1 identifizierten Versickungsdetails und Versickungsregeln angewandt. Diese systematischen Voruntersuchungen bilden die überwiegende Anzahl an förderlichen Sickengeometrien ab. Das Ziel der Optimierung ist, eine zusätzliche Versteifung der größeren Feldflächen innerhalb einer globalen Paneelgeometrie zu erzeugen.

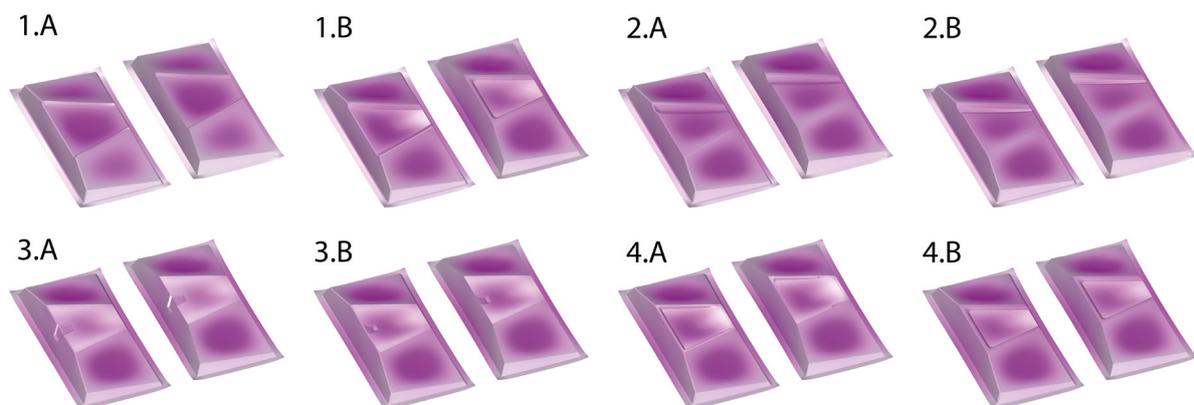


Abb. 76: Detaillierte Modellierungsgrade der Geometrie mit differenzierten Kanten und Sicken

Die statische Simulation in Karamba3D© zeigt eine globale Verbesserung im Vergleich zur Ausgangsgeometrie, verdeutlicht aber auch, dass ergänzende 3D-FEM-Simulationen mit höherem Detaillierungsgrad für eine präzise Betrachtung notwendig sind (Abb. 77).

Fall	Displacment	Displacment /w Fillet	mat. Thickness	Load
1.A	1,24	1,29	4mm	50kg/0,5kN
1.B	1,01	1,07	4mm	50kg/0,5kN
2.A	0,873	0,88	4mm	50kg/0,5kN
2.B	0,884	0,905	4mm	50kg/0,5kN
3.A	0,978	0,995	4mm	50kg/0,5kN
3.B	0,958	0,975	4mm	50kg/0,5kN
4.A	0,951	0,968	4mm	50kg/0,5kN
4.B	1,01	1,02	4mm	50kg/0,5kN

Abb. 77: Verformung unter Last für Variante A und B (/w Fillet) in cm. 1.3.8. Ausblick: statische RFEM Detailsimulation

1.3.10. Geometrische Abstraktion

Die Geometrieerzeugung für die detailliert modellierten Prototypen findet im Programm Rhinoceros3D© statt. Für die Übertragung in RFEM © wurde auf das vom Hersteller zur Verfügung gestellte Plug-in zurückgegriffen, anstatt einen Geometrieexport über ein drittes Dateiformat wie z. B. „Drawing Interchange Format“ (DXF) zu gehen.

Das Verrunden von Kanten und Ecken doppelt-gekrümmter Flächen stellte eine Herausforderung für den Datentransfer zwischen den Programmen dar.

Durch die Verrundung von Knicklinien mit den angrenzenden Flächen entstehen Flächen mit zweisinniger Krümmung. Diese können zwar als NURBS-Fläche in Rhinoceros3D© problemlos abgebildet werden, nicht aber in RFEM©. Erschwerend kommt hinzu, dass Plug-ins für den Geometrietransfer keine alternative Übersetzung der Geometrie in fein tesselierte Polygonnetze anbieten.

Dadurch wurde es notwendig, diese Stellen mit einem höheren Abstraktionsgrad in der Modellierung abzubilden. Als Downstream-Effekt bedeutet dies, dass auch die gut translatierbaren einfach gekrümmten Flächen entsprechend in planare Flächen aufgeteilt oder abgeändert werden mussten.

1.3.11. Simulationsaufbau: Auflagerkonfiguration und Ausbildung

Als Grundlage der Simulation wurden identische Rahmenbedingungen (Auflagersituation, Lastannahmen) wie in der Karamba3D© -Simulation aus dem Kapitel 1.1.11. gewählt.

Bei FEM-Software müssen die Auflager an geometrisch definierten Punkten platziert werden. Da der Rahmen in seiner Grundform (Abb. 78) nur über die vier Eckpunkte verfügt, mussten Punkte erzeugt werden, die in ihrer Platzierung der realen Einbausituation der Paneele in einer Fassade entsprechen.

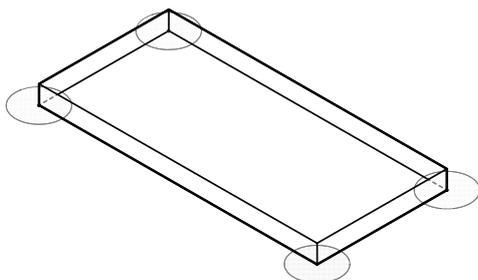


Abb. 78: Grundform des Rahmens an dem die Auflager platziert werden

Um eine gängige Auflagersituation in Vorhangfassadenbau abzubilden, wurden drei verschiedene Durchdringungen des zuvor durchgängig geschlossenen Randes des Panels erstellt und evaluiert (Abb. 79):

- Eine rautenförmige Öffnung, als abstrahierter Kreis mit dem Auflager am oberen Punkt.
- Ein Kreis mit dem Auflager auf dem Kreis Beginn/Ende
- Rechteckiger Ausschnitt, der bis zum Ende des Randes durchgezogen wurde.

Durch diesen Einschnitt (c) verliert der Rand an Stabilität, was im Hinblick auf die Simulationsergebnisse der schlecht möglichsten Annahme entspricht.

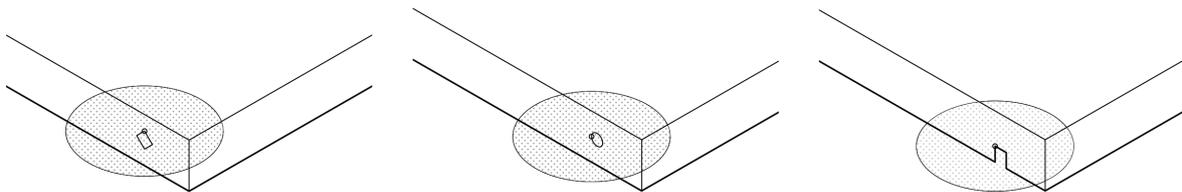


Abb. 79: v.l.n.r.: Rautenförmige und kreisförmige Bohrung, rechteckiger Ausschnitt

1.3.12. Darstellung Ergebnisse der durchgeführten RFEM-Simulationen

Zu Beginn wurden verschiedene Formen und Auflagervarianten getestet, um die Auswirkung der geometrischen Parameter auf die Tragkraft abschätzen zu können (Abb. 80).

Hierfür wurden die bereits in Karamba3D© simulierten Formen mit verschiedenen Auflagersituationen wie in 1.3.11. beschrieben aufgesetzt und in RFEM© simuliert.

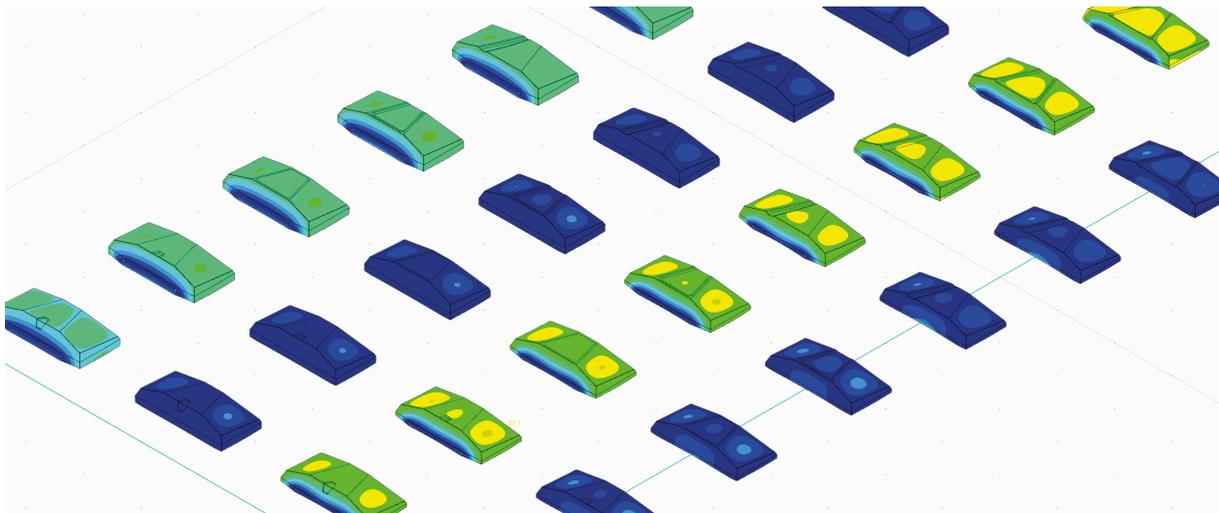


Abb. 80: Exemplarischer Ausschnitt aus den Ergebnissen der Detailsimulationen. Gut erkennbar an den Farbunterschieden ist die große Bandbreite an Geometrien und Ergebnissen

Im Anschluss wurden spezifische Parameter (Neigungswinkel der Seitenflächen und verschiedenen Paneelhöhen) für eine Auswahl der statisch besten Paneele simuliert.

Als Vorgriff ist dabei zu bemerken, dass die angenommene Windlast für alle Formen im folgenden Beispiel (Abb. 81) auf $0,25 \text{ KN/mm}^2$ reduziert wurde, um für alle Formen valide Ergebnisse zu erzielen. In dieser Simulation wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Gesamthöhen und Auflagerausbildungen in der statischen Performanz unterscheiden. Zu erkennen ist, dass eine größere Gesamthöhe deutliche positive Auswirkungen auf die Stabilität der Form hat. Die Verformung der niedrigeren Paneelformen ist in der Spitze um 18 % höher als bei den Formen mit großer Aufbauhöhe. Die Auswirkungen der verschiedenen Auflagermodellierungen (3er-Reihe) sind dabei geringfügig, mit in der Spitze keinem signifikanten Unterschied.

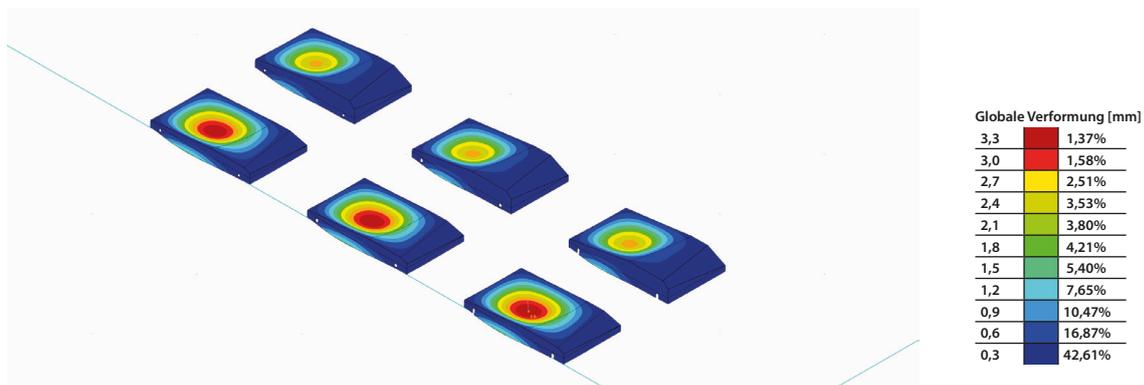


Abb. 81: 3x2 Matrix, die in der 3er Reihe verschiedene Auflagermodellierungen (v.l.n.r. hexagonal, quadratisch, rechteckiger Ausschnitt) und in der 2er Paarung unterschiedliche Gesamthöhen (100mm und 150mm).

Mithilfe einer zweiten Simulation wurden die Auswirkungen verschiedener unter 1.3.8. betrachteter geometrischer Umformungen der Ausgangsform untersucht. In diesem Beispiel (Abb. 82) werden unterschiedliche Feldkonfigurationen simuliert. Zu erkennen ist, dass der größte Unterschied zwischen einer weiteren Aussteifung im größten Feld (obere Reihe) und ohne Aussteifung in diesem Feld zu beobachten ist (untere Reihe). Zusätzliche Sicken verändern die Ergebnisse nicht signifikant. Daher ist abzuwägen, inwieweit der erhöhte Aufwand im Formenbau, bei der 3D-Modellierung, sowie bei der zusätzlichen Bearbeitungszeit im CNC-Fräszentrum beim Formenbau im Verhältnis zur statischen Verbesserung steht.

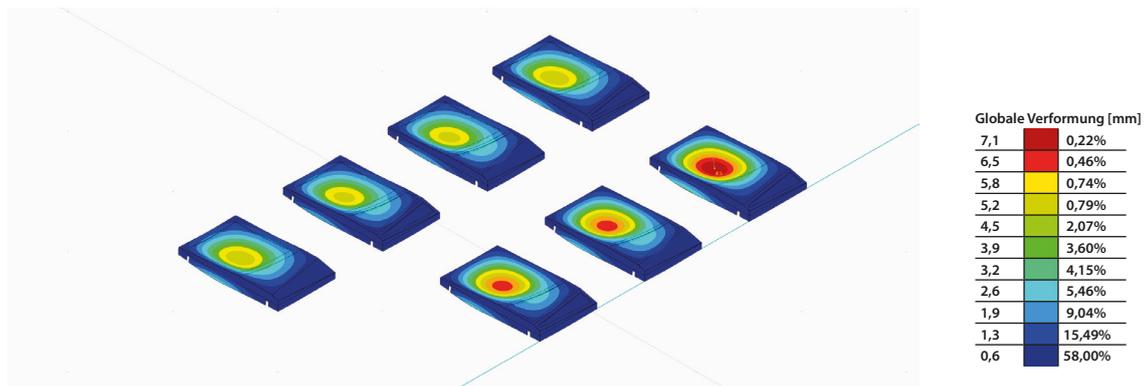


Abb. 82: Obere Reihe mit Aussteifung im großen Feld, untere Reihe ohne. In der Gegenüberstellung zeigt sich die bessere Performance der ausgesteiften Formen

Die Simulation ermöglicht eine quantifizierbare Abwägung der Vor- und Nachteile von Sicken bzw. Faltungen in der Paneelform. Zusätzlich kann ermittelt werden, welcher Anteil an zusätzlicher Detailausbildung für einen stabilen Demonstrator notwendig ist. Aufgrund des Mehraufwands im Formenbau wurde der erste Prototyp (links im Bild) weiterverfolgt. Im Anschluss wurde eine kleine, gestalterisch begründete Änderung der Form vorgenommen, in der die mit Sicken ausgesteifte große Deckfläche in Längsrichtung gekippt wurde. Im Vergleich der beiden Varianten hat diese zudem die bessere statische Performanz (Abb. 83).

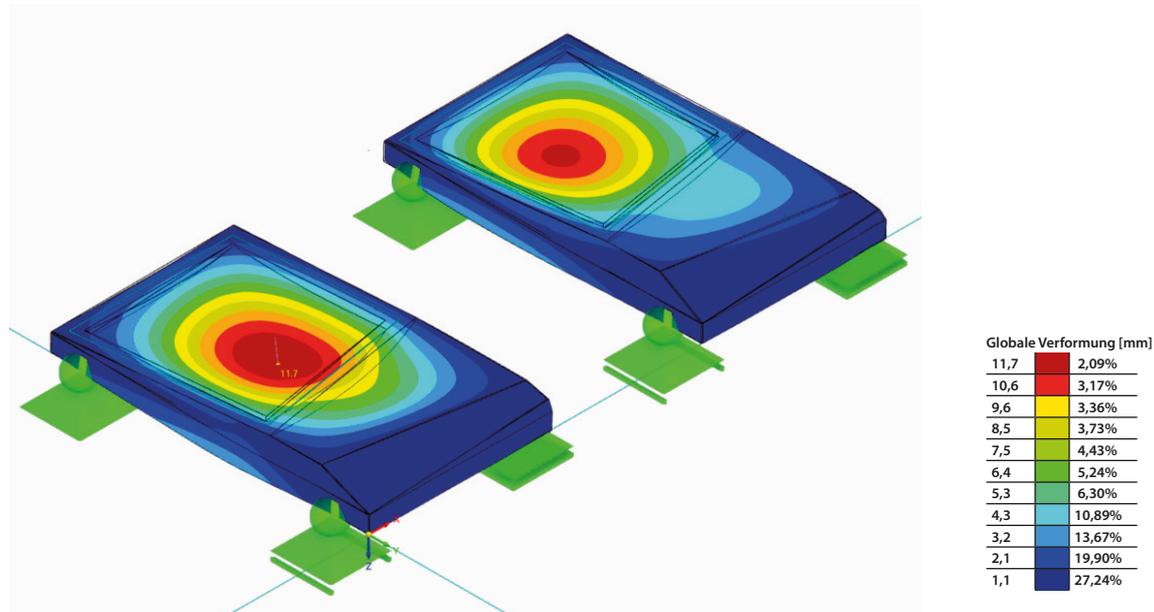


Abb. 83: Links: Ausgangsgeometrie. Rechts: Optimierte Form.

1.3.13. Erkenntnisse aus der RFEM-Simulation

Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass ein intelligenter Einsatz von zusätzlichen Faltungen und Sicken an kritischen Stellen, wie bei großen Deckflächen, sinnvoll sein kann. Ebenfalls zu sehen ist, dass ein Mehr an diesen Eingriffen die statische Performanz nicht zwingend signifikant verbessert. Im Hinblick auf den höheren Fertigungsaufwand, sollte der Einsatz von Sicken unter den Aspekten Gestaltungselement und verbesserter Aussteifung abgewogen werden.

Im Gegensatz zur vereinfachten statischen Simulation mittels Karamba3D© können im RFEM© neben der Verformung auch die Schubspannungen (N/mm^2) simuliert werden. Soweit die Grenzgrößen der Schubspannung für den laminierten Verbund (PC – TPU – OPV – TPU – PC) bekannt sind, kann dieser Kennwert neben der Durchbiegung als zusätzliches Kriterium zur Auslegung des Bauteils verwendet werden. Es ist davon auszugehen, dass sich damit eine weitere Optimierung der Materialeffizienz ergibt, da bisher die Bewertung der Geometrien ausschließlich über die Verformung der Bauteile erfolgte. Ausschlaggebend ist aber auch die Schubspannung, die auf die integrierten OPV Module wirkt. Polycarbonat besitzt eine hohe Verformungstoleranz, die nicht zwingend auf die OPV Module übertragen werden kann.

1.3.14. Ermittlung der max. Scherkräfte Verbundlaminat im Zugversuch

Um die maximalen Schubkräfte zu bestimmen, die auf die OPV Module einwirken, wurde ein Versuch mit einer Wegezugsmaschine durchgeführt. Auf zwei Polycarbonat-Elementen (Paddeln) wurde eine verbindende Platte, ebenfalls aus Polycarbonat, laminiert. Im oberen Paddel wurde eine Solarzelle einlaminiert. Die beiden kongruenten Polycarbonat-Elemente, mit Verbindungsplatte dazwischen, wurden am gegenüberliegenden Ende der Wegezugsmaschine mit je 700 bar Anpressdruck eingespannt (Abb. 84).

Durch den Anschluss eines Multimeters wurde die Spannung des vom OPV Modul produzierten Stroms gemessen. Der Versagensfall durch eine zu hohe Schubspannung tritt ein, sobald das Multimeter für das OPV Modul einen Spannungsabfall oder -ausfall anzeigt (Abb. 85).

1.3.15.1. Versuchsaufbau Zugversuche

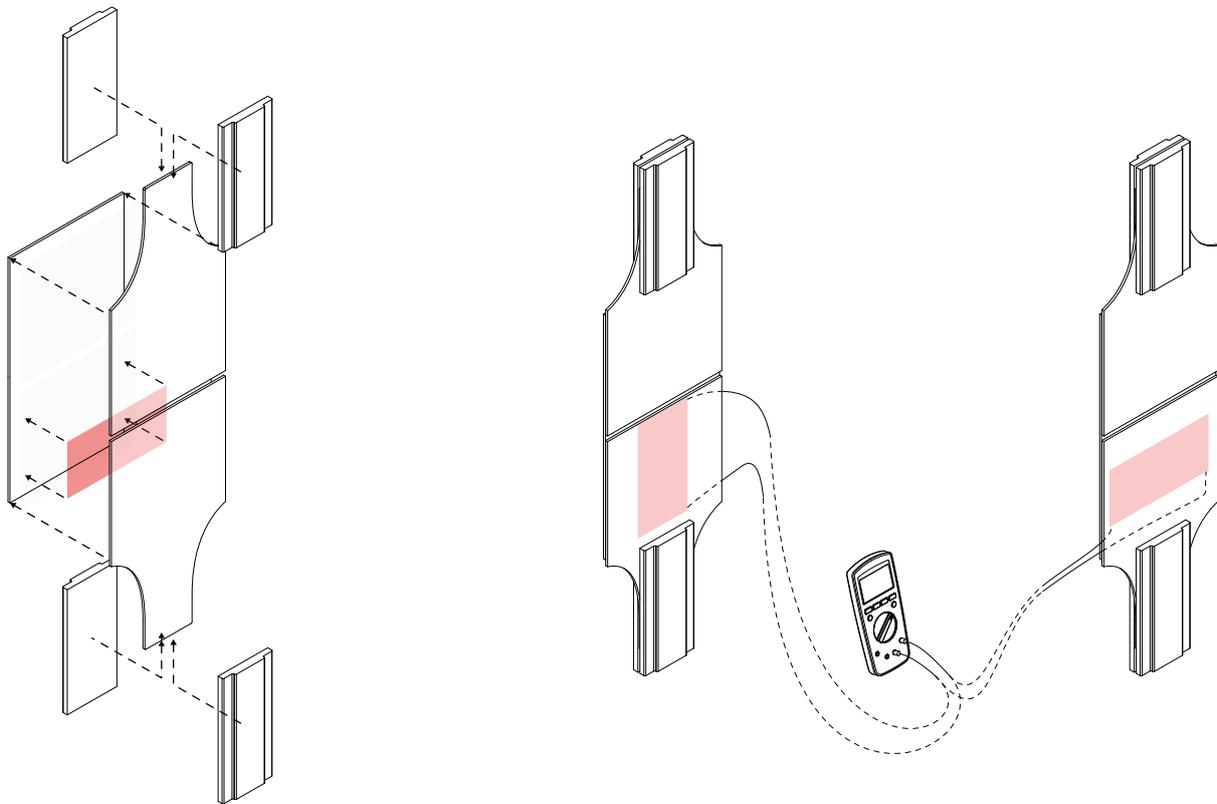


Abb. 84: Von oben nach unten: Spanbacken, Polycarbonat-Paddel, TPU, OPV Modul, TPU, Polycarbonat-Paddel, Spanbacken. Mitte und rechts zeigt die beiden Ausrichtungen des OPV-Moduls mit dem Multimeter zur Spannungsmessung symbolisch zwischen beiden Versuchskörpern.



Abb. 85: Der Versuchskörper im Teststand. Unten rechts ist das Multimeter zu erkennen, das die Spannung des OPV-Moduls misst.

1.3.15.2. Ergebnisse Zugversuche

Beim verfahren der Zugprüfmaschine wurde die Kraft und die Verschiebung des Verbundbauteils ermittelt. Bei Zug bewegen sich die beiden Polycarbonatfolien (4 mm) – verbunden durch das TPU – gegeneinander. Bei > 29.6 kN Zugkraft und einer Wegstrecke von 150 mm löste sich der Versuchskörper wiederholt aus der Halterung. Zugrunde lag hierbei eine Limitierung der Haltefähigkeit der Spanbacken in Kombination mit

der geringen Reibung zwischen Metall und Polycarbonat sowie einer Dehnung der 4 mm Polycarbonatfolie im Bereich der Einspannung. Zu diesem Zeitpunkt war das eingebettete OPV Modul in jedem Anlauf voll funktionsfähig.

Ein erster Versuch wurde zeitversetzt zu den folgenden auch mit 700 bar Anpressdruck auf den Spannbacken gefahren. Hier erreichte der Versuchskörper Werte von bis zu 31 kN Zugkraft, bevor er sich aus der Halterung löste. Daher wurden 30 kN im weiteren Verlauf als Grenzgröße für die Berechnung der zulässigen Schubspannung in N/mm^2 angenommen.

RFEM© bildet die Schubkräfte als Spannungen in der Einheit N/mm^2 ab. Die mit dem OPV Modul laminierte Fläche im Versuchskörper ist $210 \times 210 \text{ mm}$ groß, daraus ergeben sich 44.100 mm^2 .

$$30.000 \text{ N} / 44.100 \text{ mm}^2 = 0,680 \text{ N/mm}^2$$

Der Kleinserientest von insgesamt 6 Versuchskörpern zeigt eine reproduzierbare Zugbelastung bei allen Versuchskörpern. Daher wird ein Sicherheitsbeiwert mit dem Faktor 1,5 zugrunde gelegt. Für die weiteren Simulationen ergibt sich hiermit ein Grenzwert für die maximal zulässige Schubspannung von $0,453 \text{ N/mm}^2$.

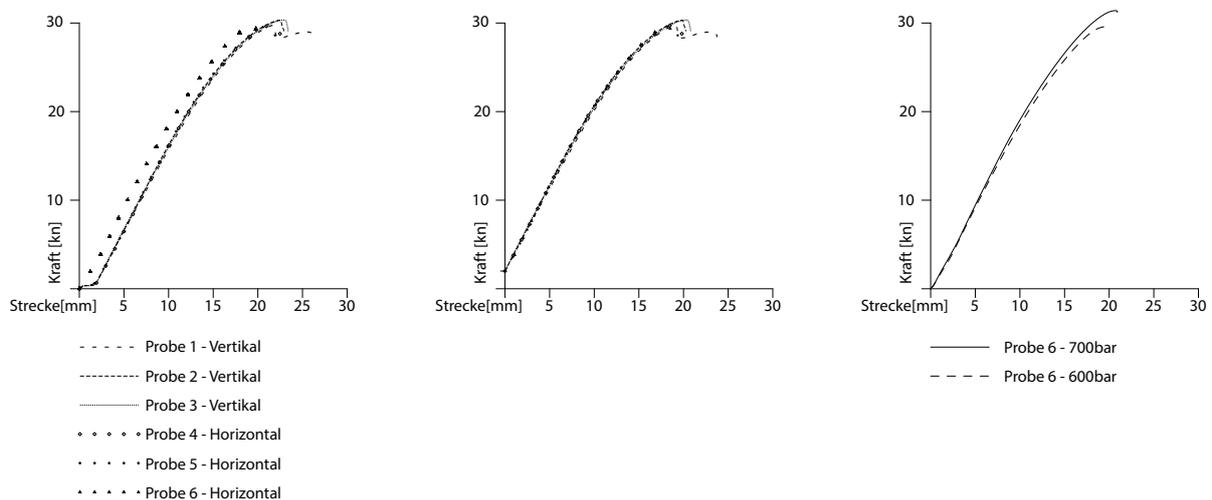


Abb. 86: Plots der Zugversuche

Die Ergebnisse der einzelnen Zugversuche sind in Abbildung 86 dargestellt. Der Versuchskörper 6 wurde zum einen an einem separaten Zeitpunkt getestet, zudem wurden zwei unterschiedliche Anpressdrücke für die Spannbacken angelegt. Da die Zugprüfmaschine bei Probe 6 keinen Testlauf durchlief, war die Maschine noch in einem Status der „Entspannung“, in dem bisher nicht alle Toleranzen ausgereizt wurden. Dies geschieht beim Verfahren, wenn auf jeden Teil der Maschine Kraft wirkt. Im Fall von Probe 6 wurde dieser Zustand der fehlenden Spannung im System mit aufgezeichnet. Im zweiten Plot wurde Probe 6 zu den anderen Proben normalisiert. Es zeigt sich ein annähernd gleichmäßiger Kraftverlauf in allen Proben.

Die beiden Durchläufe mit 700 respektive 600 bar Anpressdruck zeigen eine Verbesserung der Ergebnisse, wenn sich der Anpressdruck erhöht. Da sich der Versuchskörper auch bei 700 bar aus den Spannbacken löste, bevor es zum Material oder Versagen des Laminats kommt, lässt sich vermuten, dass bei höherem Anpressdruck auch noch höhere Werte der Schubspannung erreicht werden können.

1.3.16. Bewertung der statischen Performanz mittels Schubspannung und Verformung

Die Abbildungen 87 und 88 zeigen die Spannungen des für den Demonstratorbau ausgewählten Panels mit 4 mm Materialstärke und einer Belastung von 800 N Windkraft. In den Abbildungen sind die Spannungsverläufe in den simulierten Geometrien zu sehen. Zu erkennen sind die Spannungsunterschiede zwischen Kanten/Ecken und planaren Flächen. In den Flächen zeigt sich eine geringere Spannung pro Einheit, die stellenweise unter dem errechneten Grenzwert liegt.

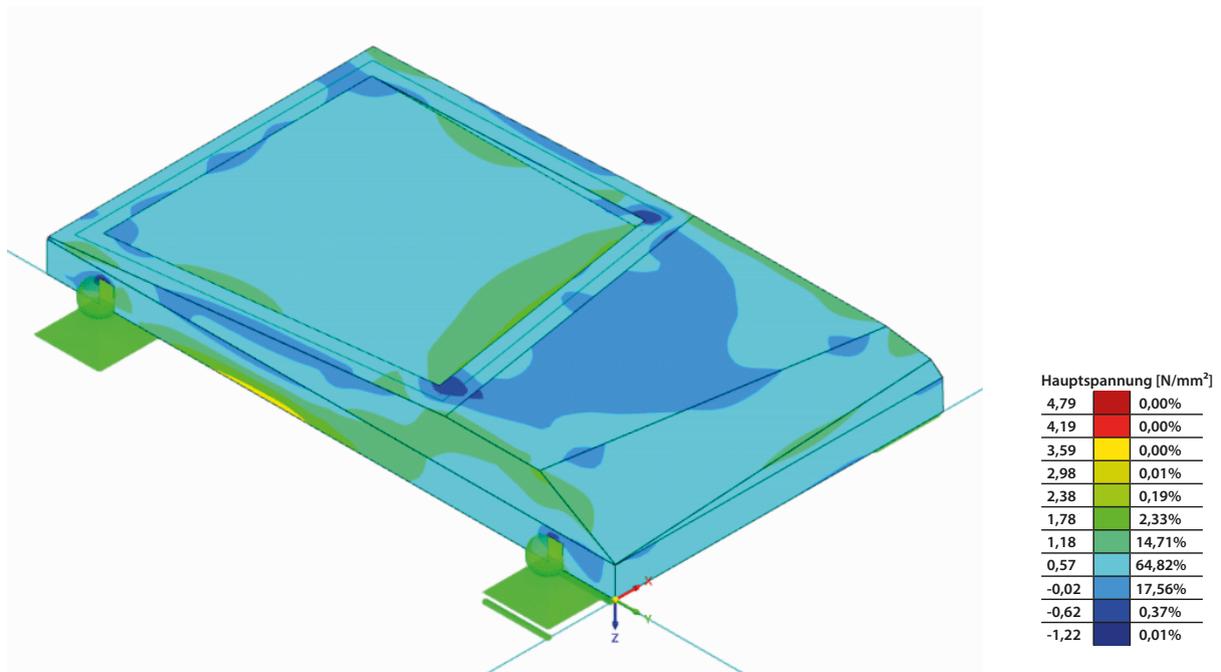


Abb. 87: Die prototypische Form in der Spannungsanalyse. Die grobe Legende zeigt die Hauptunterschiede in den Spannungsverläufen.

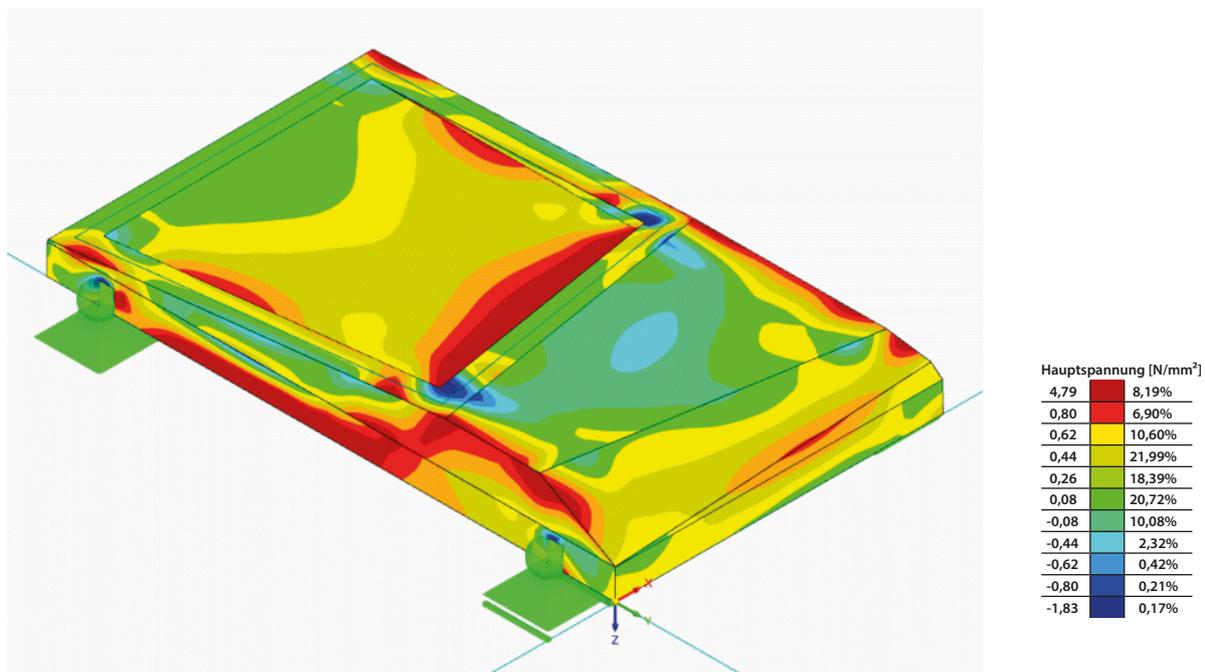


Abb. 88: Bei feinerer Auflösung ist zu erkennen, wie sich die Spannungen in den einzelnen Flächen verändern

Bei Betrachtung der beiden Schubspannungsanalysen wird deutlich, dass die in 1.3.15.1 ermittelten Werte teilweise überschritten werden. Wie in 1.3.15.2 diskutiert, ist ein höherer Grenzwert denkbar, jedoch durch die mechanischen Grenzen der verfügbaren Testmaschine nicht zu belegen. Da die ermittelte zulässige Schubspannung nur in Randbereichen von Flächen überschritten wird (rote/dunkelrote Bereiche), kann die Aussparung dieser Bereiche als valide Strategie zur Vermeidung von Schäden am OPV Modul in Betracht gezogen werden.

Weitergehenden Materialtests, die die Festigkeit der Verklebung und die Stabilität der OPV Module im Verbund im Grenzbereich untersuchen, können die zulässigen Bereiche noch erweitern und letztlich das gesamte Paneel als zulässig für OPV Module qualifizieren.

1.3.17. Digitales Planungstool und Optimierung

Um den Entwurfsprozess inklusive der solaren und statischen Analyse zugänglicher zu gestalten, wurde ein Tool in Grasshopper®, Teil der 3D-Software Rhinoceros3D®, erstellt (Abb. 89), welches das manuelle Erzeugen der Paneel-Geometrie durch Konfiguration ausgewählter Parameter ermöglicht und neben einer im 3D-Raum visualisierten Geometrie auch dessen solaren Erträge und statische Performanz numerisch und grafisch ausgibt.

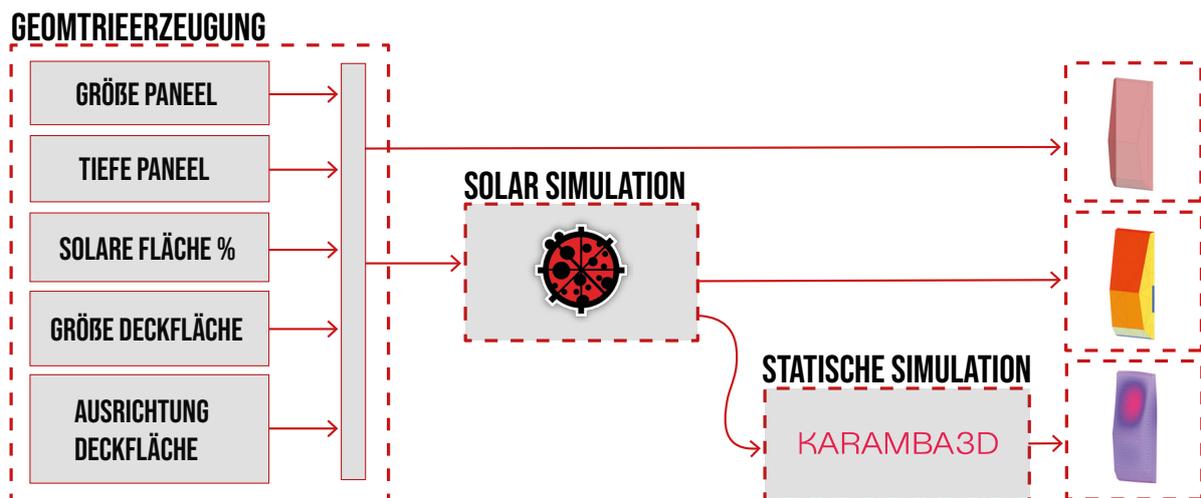


Abb. 89: Funktionsschema digitales Planungstool

1.3.17.1. Funktionsweise Planungstool

Die Erste der insgesamt vier Komponenten erstellt aus vier benutzerdefinierten Eckpunkten und mehreren sich verschneidenden Ebenen die Paneelgeometrie.

Dabei wird eine planare Ebene aus den gegebenen Punkten erstellt und in 'Schritt 00' als Kopie entlang ihrer Normalen verschoben um in 'Schritt 01' mit zwei Ebenen, deren Drehachse jeweils zwischen den beiden unteren/oberen Punkte liegen, und in 'Schritt 02' mit zwei Ebenen, deren Drehachse jeweils zwischen den beiden linken/rechten Punkten liegen, zu verschneiden. Die entstandene planare Front lässt sich in 'Schritt 03' an der oberen Kante aus der Senkrechten verdrehen und orthogonal dazu durch den Kantenmittelpunkt verdrehen, was ein Einstellen der Fläche in Richtung der Sonneneinstrahlung ermöglicht. In 'Schritt 04' wird durch Ebenen, mit Drehachse auf oberer und unterer Kante der Front, ein additives Volumen

erzeugt, das in 'Schritt 05' durch eine verschiebbare und in zwei Achsen drehbare Ebene geschnitten wird, wodurch auch die neue Frontfläche Richtung Sonne optimiert werden kann (Abb. 90).

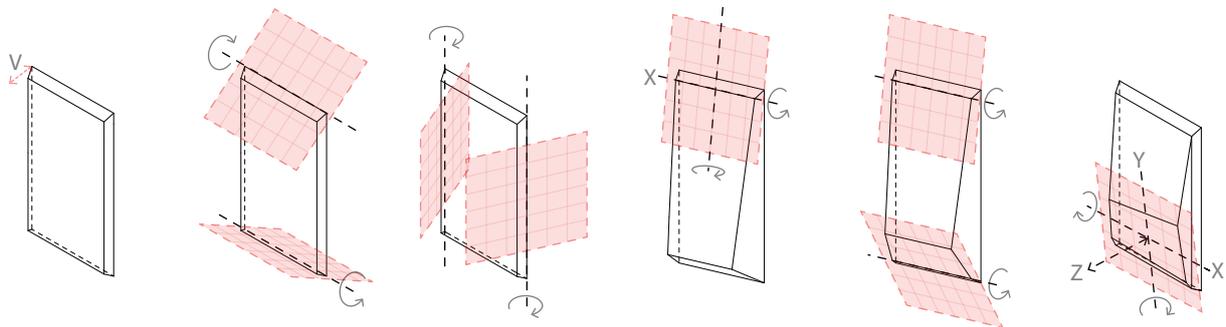


Abb. 90: Einstellungsschritte Geometrierstellung

Die zweite Komponente errechnet nach Eingabe des Standorts und Ausrichtung mithilfe des Plug-in Ladybug, anhand hinterlegter Wetterdaten, die Menge der direkten Sonnenstrahlung ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{a}$) auf der Geometrie. Um die Einbausituation des Panels und die einhergehende Selbstverschattung für die Simulation zu betrachten, wird das Paneel dreimal nebeneinander und in derselben Reihenfolge dreimal übereinander kopiert. Das mittlere Paneel kann somit inklusive Verschattung der Nachbarpaneele simuliert werden (Abb. 91). Für die Simulation wird eine OPV-Bestückung von 80 % der Geometrie angenommen.

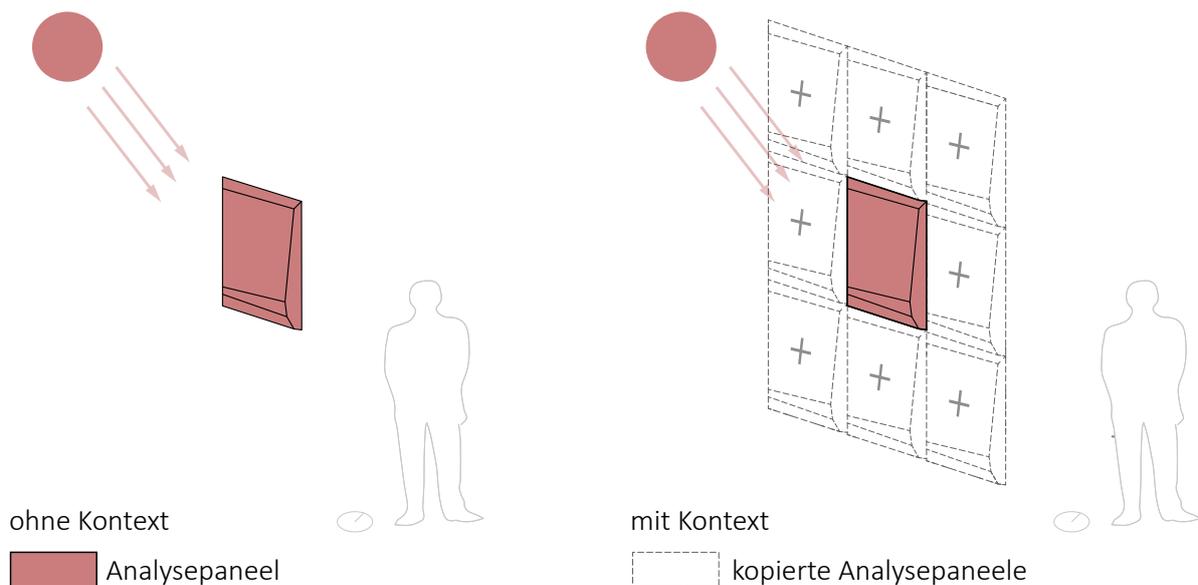


Abb. 91: Solare Simulationsbedingungen mit und ohne Kontexterstellung

Anschließend wird die Geometrie über das Plug-in Karamba3D© auf ihre statischen Eigenschaften überprüft. Simuliert wird mit 6 mm starkem Polycarbonat, das wie in Kapitel 1.1.11 Abb. 34 gezeigt, aufgelagert ist und durch das Eigengewicht und eine Windlast von $0,75 \text{ kN}/\text{m}^2$ belastet wird. Als Ergebnis werden die maximale Verformung sowie die Verformung der Geometrie ausgegeben.

1.3.17.2. Optimierung

Die letzte optionale Komponente (Abb. 92) dient der Optimierung und besteht aus dem Multi-Objective-Optimierer des Plug-ins Opossum (Wortmann 2017), der einen oder auch mehrere Werte simultan optimieren kann.

Das Plug-in wurde für Optimierungsaufgaben im Zusammenhang mit Tageslichtsimulationen im Architekturkontext entwickelt. Durch eine systematische Veränderung der involvierten Parameter kann diese Strategie durch Vergleichen der Ergebnisse rundenweise eine Näherung an das Optimum erreichen. Das Optimum ist hierbei ein Kompromiss zwischen den Zielkriterien maximalem solarem Ertrag und geringster Durchbiegung. Dabei dürfen besonders gute Werte eines Kriteriums nicht die Werte des zweiten Kriteriums kompensieren. Dies wird ausgeschlossen, indem der Algorithmus von Opossum die Zielkriterien voneinander subtrahiert, um nach nicht dominierenden Lösungen zu suchen, die sich in einer Pareto-Front¹² abbilden. Opossum bietet mehrere Rechenmodelle, um dieses Optimierungsproblem zu lösen.

In diesem Tool werden zunächst der solare Ertrag und die statische Verformung mit dem RBFOpt (Costa, Nannicini 2014) Rechenmodell optimiert. Dabei werden die Ergebnisse aus solarer und statischer Simulation nicht direkt in den Optimierer eingespeist, sondern vorab auf Rahmenbedingungen überprüft, z. B. maximal realisierbare Tiefzugtiefe. Bei Nichterfüllung werden die Ergebnisse der Simulationen verschlechtert, wodurch einen weiteren Variablenbezug für den Optimierer entsteht.

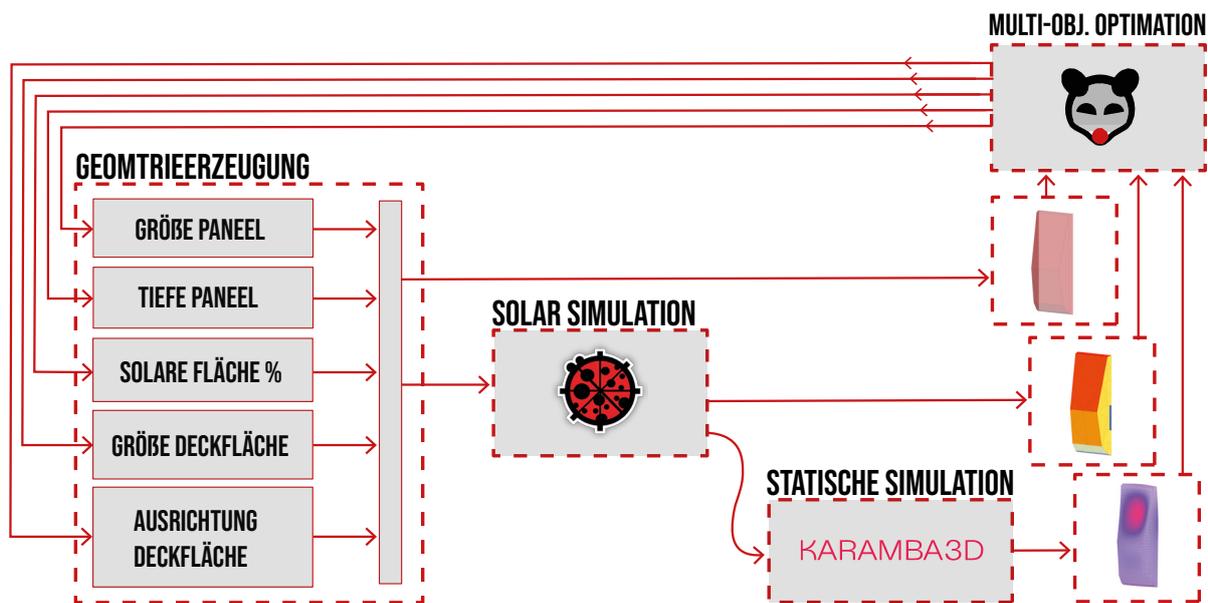


Abb. 92: Aufbau des Planungstools mit Loop zur Optimierung

(12)

Pareto-Front, oder auch Pareto-Optimum. Begriff aus der Ökonomie nach Vilfredo Pareto, einem italienischen Wirtschaftswissenschaftler. Das Pareto-Optimum oder die Pareto-Front beschreibt sinngemäß einen Punkt, an dem eine Eigenschaft eines Betrachtungsobjekts nur dann verbessert werden kann, wenn eine andere Eigenschaft verschlechtert wird (vgl. bpb, 2021).

Alle Optimierungsergebnisse werden aufgezeichnet, von Ergebnissen, die die Rahmenbedingungen nicht erfüllt haben, befreit und nach solarem Ertrag sortiert ausgegeben (Abb. 93).

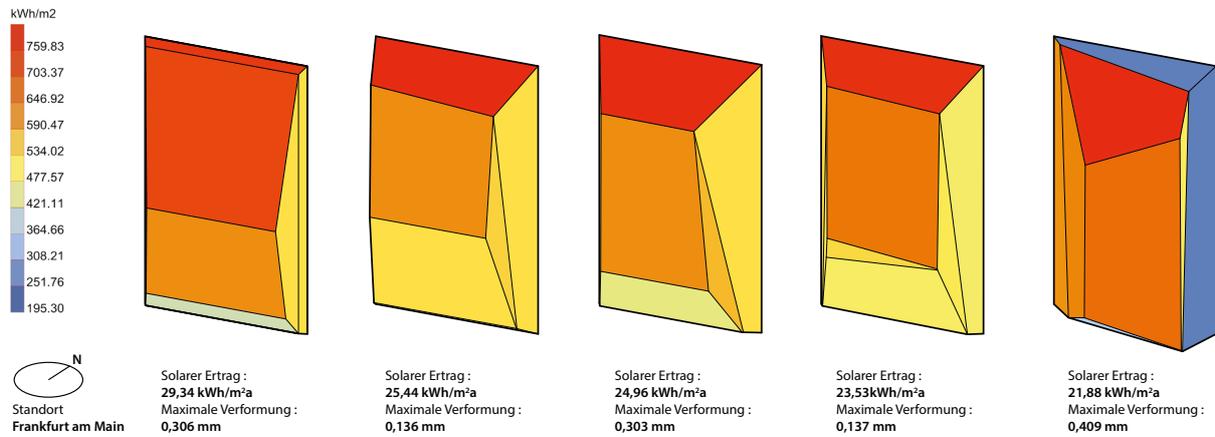


Abb. 93: Ergebnisse Einzelpaneeloptimierung

1.3.17.3. Vergleich Optimierungsvarianten

Um die Abhängigkeit der Panel-Geometrie zur Verschattung durch benachbarte Paneele zu untersuchen, wurde ein zweiter Optimierungsaufbau konzipiert (Abb. 94). Dieser optimiert nicht mehr ein Paneel, sondern eine Fassade aus einer Matrix von 4×3 Paneelen. Dabei wird das erste Paneel als Simulationskontext um sich selbst instanziiert, und alle folgenden Paneele mit den zuvor berechneten Paneelen als Kontext für die Verschattung simuliert.

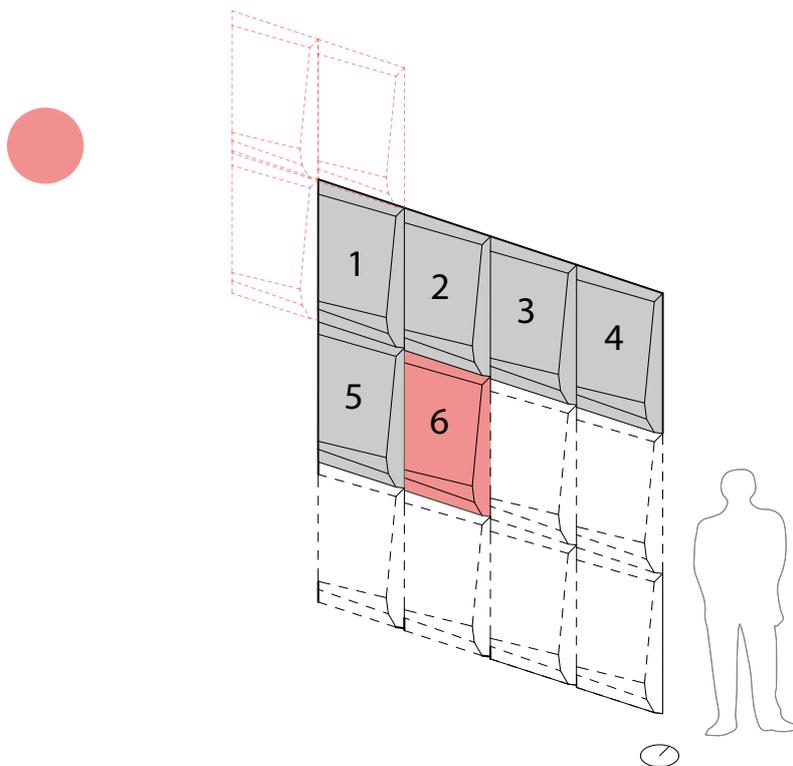


Abb. 94: Geometrieordnung zur Simulation von Selbstverschattung

Die Ergebnisse dieser Simulationsvariante liegen bei beiden Optimierungszielen unter den Werten der Einzelpaneel-Simulation (Abb. 95). Der solare Ertrag weicht nur geringfügig ab (<5%), es kann somit argumentiert werden dass die Verluste nicht signifikant sind. Da bei einer gruppierte Anordnung von Panelen der Gesamtertrag der Fläche höher ist, ist von einer Kompensation des Einzelpanelergebnis auszugehen.

Kritischer ist die maximale Verformung zu betrachten, die doppelt so groß ist beim Vergleich der beiden Paneel-Varianten mit dem höchsten solaren Ertrag. Allerdings stellt auch die deutlich höhere Verformung keine Gefahr für Paneel oder Solarmodul dar.

Mit Blick auf die Rechenzeiten, die ein zwölffaches der Einzelpaneel-Simulation beträgt und der immensen Variationsmöglichkeiten ist eine effiziente Optimierung in Echtzeit über diesen Simulationsaufbau aktuell nicht umsetzbar.

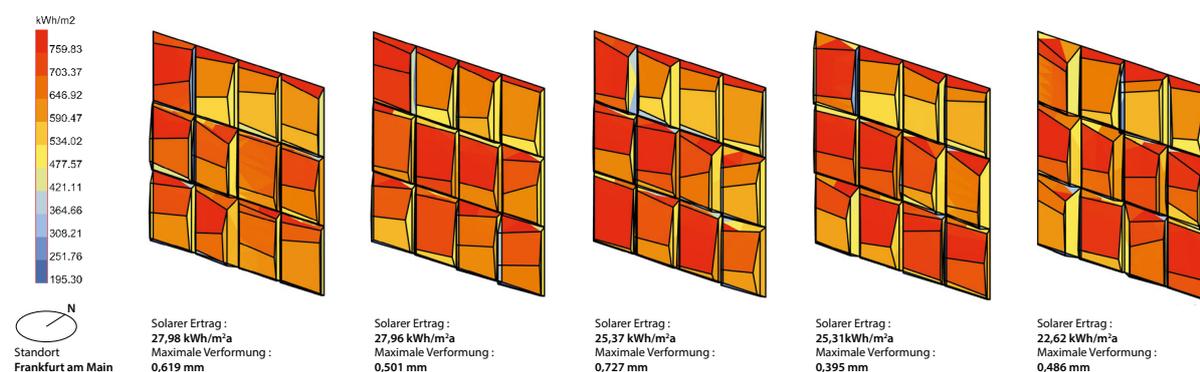


Abb. 95: Ergebnisse Fassadenoptimierung

1.4. Arbeitspaket 4: Abschließende digitale Modellierung und Modellversuche für eine ausgewählte Großform als Demonstrator

1.4.1. Formenbau und thermoplastische Umformung

Als Material für das Werkzeug (in diesem Kontext beschreibt der Begriff die Negativform, über die der erhitzte Kunststoff thermoplastisch umgeformt wird) wurde das Kunststoffmaterial „V 4417“ (Girrbach, 2021) gewählt, da es ein fester, gut zu zerspanender Kunststoff ist. Dieser wird in Rohblockmaßen gegossen vom Hersteller geliefert und kann mit typischen CNC-Bearbeitungsmethoden auf die gewünschte Geometrie und Wunschmaße gefräst werden (Abb. 96). Hierbei ergibt sich ein Kostenvorteil gegenüber anderen geeigneten Werkstoffen, wie Aluminiumlegierungen, da neben dem geringeren Rohstoffpreis der Bearbeitungsprozess schneller und mit weniger Verschleiß durchgeführt werden kann. Nachteile des Materials werden erst bei größeren Stückzahlen in der Serienfertigung sichtbar, da die Formhaltigkeit des Werkzeugs im Vergleich zu Metallwerkzeugen schneller nachlässt. Die Prozessabläufe des thermoplastischen Umformens sind im Industriebereich Stand der Technik und für Serienfertigungen größerer Stückzahlen geeignet (Kunststoffe.de, 2023).



Abb. 96: v.l.n.r.: Grundform aus V 4417, Form im CNC-Bearbeitungszentrum, fertige Tiefzugwerkzeuge.

Für den Prozess des Tiefziehens werden mehrere Werkzeuge benötigt, die unterschiedliche Funktionen erfüllen. Für jedes geplante tiefgezogene Fertigteil werden zwei Werkzeuge benötigt:

- a) Negativform für den thermoplastischen Umformungsprozess
- b) Eine an den Materialschwund angepasste Negativform zum Besäumen des tiefgezogenen Fertigteils.

Der Kunststoff (Polycarbonat) wird erhitzt, bis er den thermoplastischen Bereich erreicht und dann über ein Werkzeug tiefgezogen, das die Maße der angestrebten Form hat. Nach Erkalten des Kunststoffs entsteht so das gewünschte Formteil (Abb. 97). Dieses wird vom Werkzeug abgezogen, um in der Serienfertigung das nächste Teil tiefzuziehen. Die erkaltete, vom Werkzeug abgezogene Kunststoffform (Fertigteil) schrumpft, bedingt durch die Temperaturänderungen, um einen gewissen Grad seiner Gesamtgröße. In diesem Anwendungsfall handelt es sich dabei um maximal ca. 1 %, was bedeutet, dass die tiefgezogenen Folien ca. 99 % der Ausgangsgeometriegröße aufweisen. Im zweiten Schritt wird das vom Folienmaß der Zielgeometrie überstehende Rohmaterial vom fertigen Tiefzugteil entfernt.

Dazu wird dieses auf ein Werkzeug aufgelegt, das um den Faktor 0.99 skaliert wurde, wodurch garantiert ist, dass das Teil auf dieses Werkzeug passt und bei der weiteren Bearbeitung nicht verrutschen kann. Anschließend wird das Werkzeug mit aufgesetztem Folienteil in einem CNC-Bearbeitungszentrum (idealerweise mit fünf Achsen) positioniert und besäumt. Dieser Vorgang kann dann für alle weiteren Teile ohne zusätzliche Rüstzeit wiederholt werden.

Hieraus ergibt sich der Bedarf für zwei Werkzeuge pro tiefgezogener Foliengeometrie. Um den Verbrauch an Rohmaterial für den Werkzeugbau zu reduzieren, besteht die Möglichkeit, das erste Werkzeug für den thermoplastischen Umformungsprozess nachträglich zu bearbeiten, um dadurch die zweite, um 1 % kleiner skalierte Werkzeuggeometrie zu erhalten. Dieser Schritt ist nicht reversibel, sodass ein neues Werkzeug gefertigt werden muss, wenn z. B. in einem weiteren Produktionslauf neue Folienteile tiefgezogen werden sollen. Zum Bau eines Sun Skins Fassadenelements, das aus vorderer und hinterer Schale besteht, werden mindestens zwei Werkzeuge benötigt.

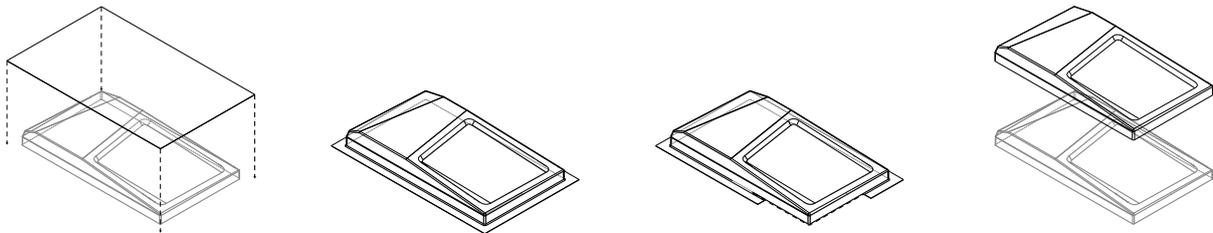


Abb. 97: v.l.n.r.: Erhitzen der Polycarbonat-Folie, Überziehen der erhitzten Folie über die Form, Besäumen des abgekühlten Polycarbonats und entfernen des fertigen Teils.

1.4.2. Laminieren eines Verbundbauteils

Wie in Kapitel 1.1.9. beschrieben, handelt es sich bei den erforschten Fassadenelementen um Verbundbauteile. Diese bestehen aus je zwei Schichten Polycarbonat, als Trag- und Deckschicht, zwei Lagen thermoplastisches Urethan (TPU), sowie den dazwischen eingelegten OPV Modulen mit Verdrahtung.



Abb. 98: Auflegen der unteren Schale auf das Werkzeug, Reinigen der Schale, Anheften der Drahtverbindungen für die OPV-Module auf dem TPU.

Der Verbund entspricht in Aufbau und Herstellung einem Verbundsicherheitsglas (VSG) (Schittich et al., 2006). Es können dementsprechend Techniken und Einrichtungen zum Einsatz kommen, die Stand der Technik für die Herstellung von VSG Glas sind.

Die Demonstratoren für die Sun Skins Paneele wurden im Rahmen des Projekts von der Firma „Inglas GmbH“ hergestellt. Dafür wurde das in Kapitel 1.4.1. beschriebene Werkzeug der unteren Deckschale auf 99 % seiner Größe nachgearbeitet, um dieses als Negativform für das Laminieren des Verbundbauteils (PC-TPU-OPV-TPU-PC) zu nutzen.

Auf das Werkzeug wurde zuerst die innere Tiefzugfolie platziert. Anschließend wurde die Oberfläche, die im Verbund innen liegt, mit passenden Reinigungsmitteln und Kleberollen gereinigt. Darauf wurde die erste Lage des wie ebenfalls in Kapitel 1.1.9. beschrieben in der Abwicklung zugeschnittenen TPUs gelegt.

Im dritten Schritt wurde die Schutzfolie des TPUs entfernt und die OPV-Module mit Verdrahtung platziert. Die als elektrische Verbindungen dienenden Drähte wurden dabei partiell mit einer Heißluftpistole an das TPU

„angeheftet“ (d. h. durch kurzes, punktuelle Erhitzen des TPU) und anschließend durch Anpressen mit einem Metallwürfel verklebt (Abb. 98). Die zweite Lage TPU wurde analog zur ersten platziert. Die beiden Drähte, die jeweils positiven und negativen Pol führen, wurden nach außen gelegt und mit einem hitzeresistenten Klebeband daran gehindert, im Randbereich während des folgenden Laminierens im Autoklaven mit den beiden TPU-Schichten zu verkleben. Das Ziel war, die Drähte an dieser Stelle leichter freischneiden zu können, um eventuell ein Adapterelement für Stromstecker anbringen zu können. Zum Abschluss wurde die obere PC-Schale aufgelegt.



Abb. 99: Das zu laminierende Teil im Vakuum Sack vor und nach absaugen der Luft sowie auf dem Teileträger.

Besonderes Augenmerk musste auf eine staubfreie Verarbeitung gelegt werden, was zu einem hohen manuellen Reinigungsaufwand führte. Zudem erwies sich die Vertiefung in der großen Deckfläche, also die aussteifende Sicke, als problematisch. Durch die in Teilen zweisinnig gekrümmte Geometrie des Kantenverlaufs musste mit zusätzlichen TPU Streifen nachgebessert werden, um eine ausreichende Deckung der beiden PC-Schalen durch das TPU zu gewährleisten.

Anschließend wurde das so vorbereitete Panel mitsamt dem Tiefzugwerkzeug auf ein Abreisvlies gelegt, das wiederum auf einer luftdichten Folie gelagert wurde. Mit einem zusätzlichen Vlies und einer Folie aus Silikon wurden beide Folien mit luftdichtem Silikonklebeband verbunden, wobei ein Ventil für das spätere Abwischen der Luft in den nun entstandenen Sack integriert wurde. Schließlich wurde die Luft abgesaugt, wobei manuell während des Vorgangs kontinuierlich die Luft durch den Vakuumsack gen Absaugstutzen gedrückt werden musste (Abb. 99).



Abb. 100: Der leere, geöffnete Autoklav, die Teile im Autoklav, ein fertiges Element.

Das im Vakuumsack verpackte Paneel wurde in den Autoklaven geladen. Beim Autoklavieren handelt es sich um einen Vorgang, bei dem über einen Zeitraum von mehreren Stunden Werkstücke in einer dampfdichten Röhre unter Druck von 1 bis 3 Bar auf Temperaturen um etwa 120° bis 140 °C erhitzt werden. Je nach Produkt schmilzt das TPU bei etwa 110°-130° (Covestro, 2024). Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Vernetzung, wobei die beiden Polycarbonat-Teile miteinander verklebt (Abb. 101). Während der Zeit, die das Bauteil im Autoklav ist (ca. 300 - 480 Minuten), muss eine gleichmäßige und langsame Erwärmung und Abkühlung gewährleistet werden.

1.4.3. Wegezugsversuch des Verbundbauteils

Mit Fertigstellung der laminierten Paneele konnten die vorab virtuell simulierten Verformungen am physikalischen Versuch überprüft werden. Die Größe des Panels von ca. $950 \times 550 \times 100$ mm übersteigt dabei die Maße typischer Proben, die für den Wegezugsversuch verwendet werden. Daher wurde eine Adapterplatte zur Simulation einer flächigen Windlast gebaut.

Die Adapterplatte des Druckstempels hat einen Durchmesser von 100 mm, wodurch die Kräfte zentral im Aufspannbereich der Maschine wirken. Um die gewünschte Simulation der Windkräfte, also einer gleichmäßigen Flächenlast, zu erreichen, wurde eine Negativ-Form des zu testenden Panels erstellt. Hierfür wurden Lamellen aus 10 mm starken MDF gefräst und mit einem rechteckigen Innenraster von $57,5 \times 107,5$ mm zu einer sogenannten „Waffle-Structure“¹³ zusammengesteckt. Der Werkstoff MDF (Mitteldichte Faserplatte) wurde als Material gewählt, da es kostengünstig zu beschaffen und in der zur Verfügung stehenden Werkstatt gut zu bearbeiten war.

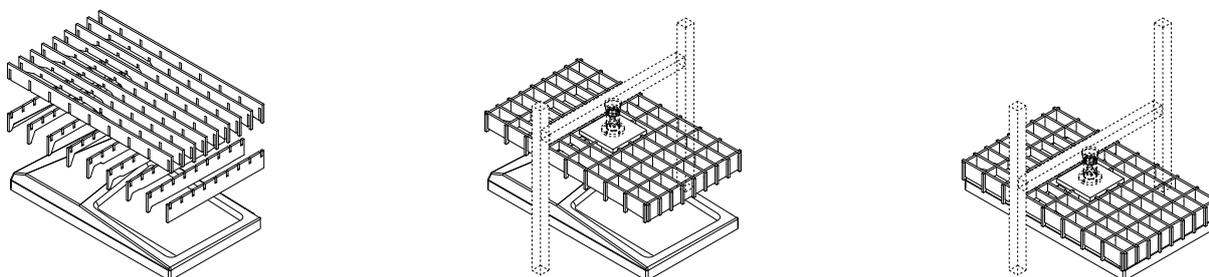


Abb. 101: „Waffle-Structure“ in der Explosionszeichnung, der fertige Druckstempel an der Wegezugsmaschine und die Bewegungsrichtung der Maschine während des Versuchs.

Diese Negativform wurde über die Adapterplatte an den Druckstempel angebracht und auf Höhe des eingespannten Versuchskörpers, des Paneels, gefahren (Abb. 101). Die Funktionalität der eingebauten OPV-Module wurde kontinuierlich mithilfe eines Multimeters durch eine gelieferte Spannungsmessung überwacht. Die Wegezugsmaschine wurde mit 5 mm/min Geschwindigkeit gestartet und nach etwa 25 mm zurückgelegter Strecke gestoppt, als einige Lamellen der Negativform Bruchstellen aufwiesen. Dies wurde zuerst akustisch wahrgenommen und später durch eine visuelle Überprüfung bestätigt.

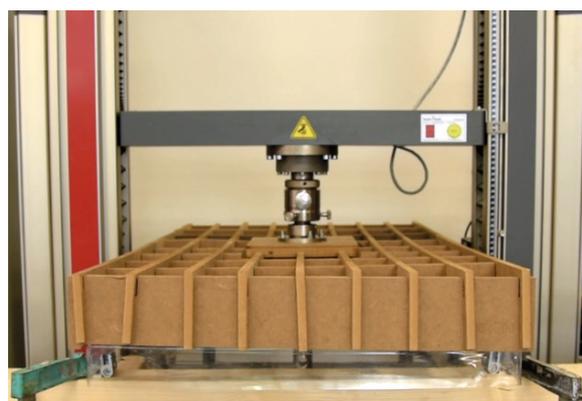
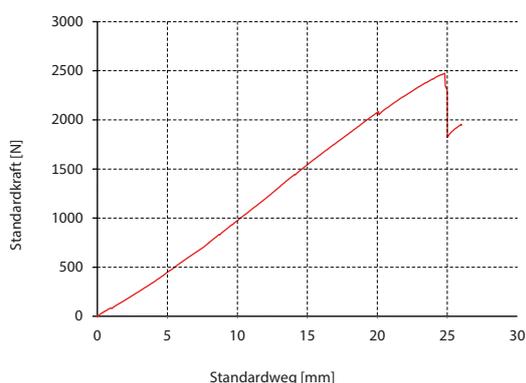


Abb. 102: (links) Die Grafik zeigt den Verlauf der auf den Versuchskörper einwirkenden Kräfte anhand des gefahrenen Wegs(X-Achse) und der aufgebrachtten Kraft(Y-Achse); Versuchskörper in der Wegezugsmaschine, gut zu erkennen die Durchbiegung des Druckstempels aus MDF (rechts).

(13)

Als Waffle-Structure werden i.d.R. Strukturen bezeichnet, die aus in einer Ebene gekreuzten Trägern besteht. Dadurch kann die Waffle-Structure ähnlich einer Platte gleicher Stärke Kräfte aufnehmen, das Eigengewicht und der Materialverbrauch sind jedoch geringer (vgl. Galeb, Zainab 2011).

Bis zu diesem Punkt des Abbruchs des Versuchs erreichte die Wegezugsmaschine eine Kraft von 2500 N (Abb. 103). Die Überwachung der OPV-Module ergab zu jedem Zeitpunkt eine annähernd konstante Spannung.

Da der Abbruch des Versuchs durch den Versagensfall der MDF-Adapterplatte erfolgte, ist davon auszugehen, dass die gemessene Kraft in einem Versuch bis zum Versagen des Versuchskörpers höher ausfallen würde (Abb. 103).

Die gemessenen 2,5 kN liegen deutlich über den benötigten 1,0 kN die laut Norm (DIN EN 1991-1-4:2010-12) für eine Verwendung in einer Fassade erforderlich sind.



Abb. 103: Einer der Autoren auf dem getesteten Panel nach absolvieren des Wegezugsversuchs. Die Gesamtbelastung beträgt etwa 75kg.

Der ursprünglich geplante Sun Skins Demonstrator wurde für die Ausstellung auf der Bau München 2023 überarbeitet und zu einem Ausstellungsexponat weiterentwickelt (Abb. 104). Damit ergaben sich veränderte Rahmenbedingungen in der Größe und im Umfang.

In der ursprünglichen Planung sollte der Demonstrator im Schwerpunkt folgende Aspekte zeigen:

- a) Anwendung der entwickelten digitalen Modellierungsumgebung
- b) Herstellungsprinzip, Fertigungsqualität und geometrische Vielfalt der Formbauteile
- c) Gestaltbarkeit und Ästhetik des entwickelten Systems

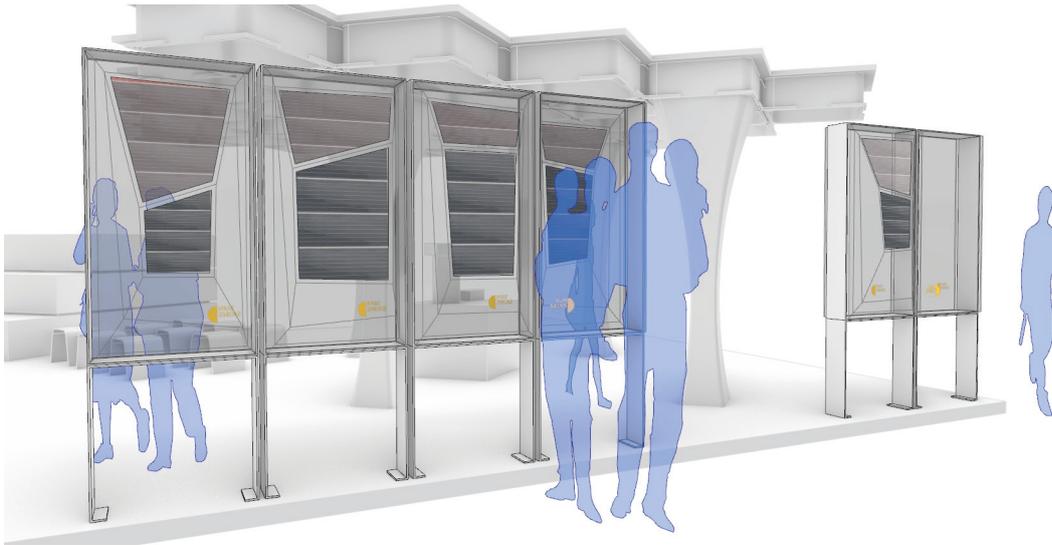


Abb. 104: Vorentwurf mit OPV-Zellen, die auf die Trägergeometrie abgestimmt sind.

Durch die vielfältigen funktionalen Anforderungen eines Messeauftritts wurde der Demonstrator nun als eine zweiseitige Schauffassade entworfen. Daraus ergab sich eine gestalterisch reduzierte geometrische Komplexität für die dreidimensionalen PC-Trägerelemente mit funktionsfähig integrierten OPV Modulen. Zusätzlich konnten überlagernd aufgedruckte Muster getestet werden, um den Gestaltungsspielraum des Ansatzes zu verdeutlichen.



Abb. 105: Entwurf der Schauffassade, mit planaren Fassadenelementen, thermo-geformten Trägerelementen mit einlaminieren OPV-Zellen sowie aufgedruckten Mustern unterschiedlicher Dichtigkeit.

Die im Tiefziehverfahren dreidimensional ausgebildeten Träger-Paneele sind mit zwei verschieden gestalteten OPV-Modulen bestückt, um die Variabilität des entwickelten Systems zu verdeutlichen – speziell an die Geometrie der Träger-Elemente maßgeschneiderte OPV-Module konnten aus Zeit- und Kostengründen nicht realisiert werden.

Die Kombination aus 3D-Formteilen mit planaren Teilflächen vereinfacht die Integration der OPV-Module sowie der Träger-Elemente in eine Standard-Fassadenkonstruktion innerhalb eines variierenden Rasters aus zwei verschiedenen großen Rechtecken (Abb. 105).

Das eigens entwickelte und als digitales Modell programmierte Muster für die Fassaden-Paneele ist, für den Demonstrator, in vier Auflösungsgraden und in zwei verschiedenen Geometrievarianten realisiert (Abb. 106). In Ergänzung zu den OPV-Modulen können über die unterschiedlichen Muster verschiedene Grade von Blickdichtigkeit erzeugt werden. Zusätzlich kann über die Dichte und den Reflektionsgrad der aufgedruckten Muster die passive Verschattung standortspezifisch angepasst werden. Darüber hinaus sind die Muster auch eine eigenständige Ebene der Fassadengestaltung, die eine grafische und farbliche Modellierung architektonischer Hüllflächen in unterschiedlicher Skalierungen erlaubt, wie beim Frog Queen Projekt (Splitterwerk, 2009) des österreichischen Architekturbüros Splitterwerk, das einen Baukörper grafisch auf verschiedenen Skalierungsebenen optisch auflöst.

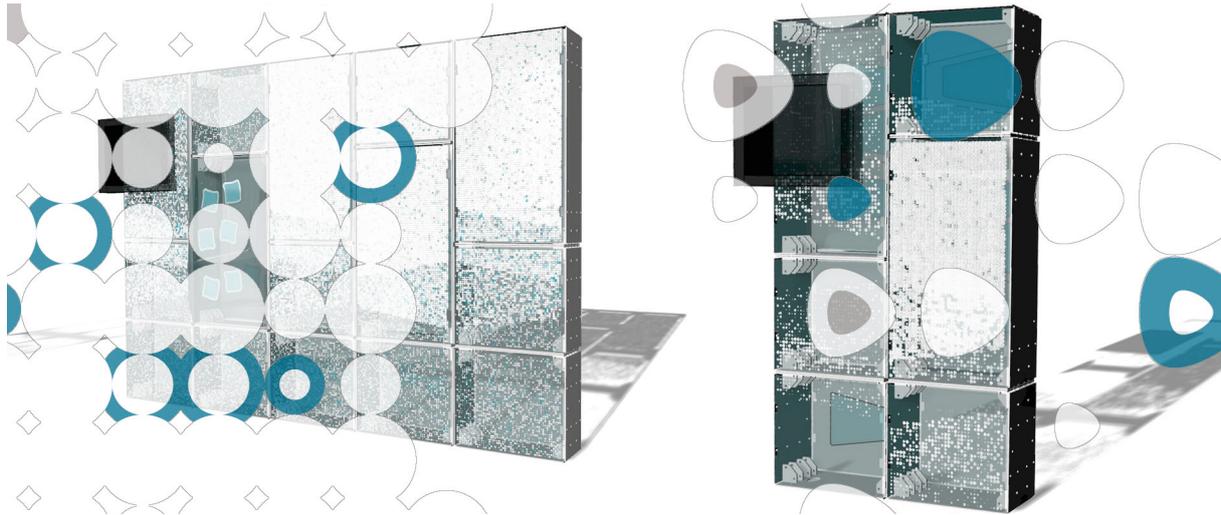


Abb. 106: Innenseiten der Schauffassade mit zwei verschiedenen Mustern in unterschiedlicher Blickdichtigkeit.

Die Mock-UP in Form einer Pfosten-Riegelkonstruktion zur Aufnahme der 3D-geformten Fassadenelemente wurde aus 6mm HPL (High Pressure Laminate) Vollkernplatten und einer Kombination aus speziellen Möbel- und Messebaubeschlägen entworfen und als CNC (Computer Numeric Controlled) - Fräs-Konstruktion realisiert.

1.4.5. Demonstrator auf der Bau München

Die Schauffassade war vom 17. bis 22. April 2023 auf der Messe BAU München am Stand von Zukunft Bau zu sehen (Abb. 107), der gemeinsam vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) und dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) organisiert und betreut wurde.

Der Demonstrator wurde aus Gründen der Begehbarkeit in zwei verschiedenen große Blöcke unterteilt. Diese zeigen zwei unterschiedliche Varianten von Mustern und OPV-Modulen, wobei für beide Blöcke die gleichen tiefgezogenen Basisformen verwendet wurden. Auf der nach innen gewandten Seite waren Teile der Fassadenelemente als grafische Infotafeln ausgeführt, die

- a) einen Projektüberblick gaben
- b) das Herstellungsprinzip der tiefgezogenen 3D-Elemente veranschaulichten
- c) den computergestützten Designansatz skizzierten
- d) eine illustrative Darstellung für eine Sun Skins Fassade zeigt und schließlich noch die Projektpartner:innen auflistet (Abb. 108).



Abb. 107: Der linke Teil der Schauffassade, mit planaren Fassadenelementen, thermo-geformten Trägerelementen mit einlamierten OPV-Zellen sowie aufgedruckten Mustern unterschiedlicher Dichtigkeit.

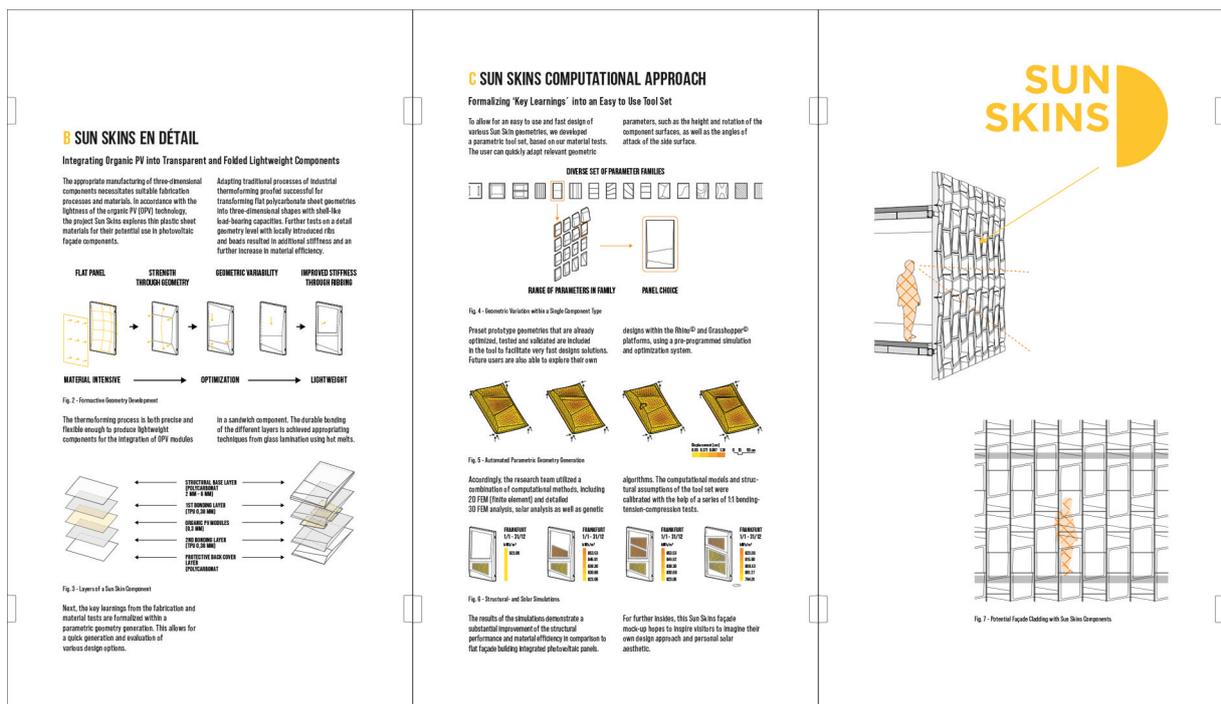


Abb. 108: Drei der fünf Infotafeln der Schauffassade Sun Skins. Herstellungsprinzip (links), digitaler Designansatz (mittig) und Illustration der Elemente als Vorhangfassade.

Anders als bei dem auf der MS Wissenschaft gezeigten Exponat (siehe Kapitel 1.3.7.2.), lag der ausstellungsdidaktische Schwerpunkt hier nicht auf der interaktiven Darstellung des Zusammenhangs von Formgenerierung, Ausrichtung und solarer Energiegewinnung, sondern vielmehr auf der Darstellung der Projektergebnisse – diese zeigen im Kern die entwickelten digitalen Werkzeuge sowie die damit entworfenen, verbesserten und realisierten Verbundbauteile.

Zwei ebenfalls zur Innenseite des Messestandes ausgerichtete Bildschirme zeigen zeitversetzt unter dem Titel „Sun Skins – Adaptable Lightweight Photovoltaics For Urban Spaces“ einen rund zwei-minütigen Film zum Projekt, der in fünf Kapiteln die wesentlichen Aspekte des entwickelten Entwurfsansatzes und die verwendeten Methoden grafisch illustriert und in einen Zusammenhang bringt (Abb. 109). Zuerst werden die Möglichkeiten der Erzeugung und parametrischen Veränderung vielfältiger Formen angedeutet und das Herstellungsprinzip der 3D-Formteile gezeigt. Das Kapitel „Strength Through Geometry“ erklärt das statische Prinzip, das in Kombination Elemente der Sickenlehre und formaktive Geometrien verwendet, die eine schalenähnliche Tragwirkung entfalten. Im Abschnitt „Digital Planning Tool“ werden die drei Grundelemente der digitalen Methode erläutert – parametrische Variation von Formen, solare Strahlungsanalyse und vereinfachte statische Strukturanalyse, zusammengebunden in einem durchgängigen digitalen Workflow. Das abschließende Kapitel zeigt beispielhaft die Möglichkeiten einer multiobjektiven Optimierung, deren Kriterien der solare Ertrag, eine möglichst große strukturelle Leistungsfähigkeit bei möglichst geringem Materialverbrauch sind.



Abb. 109: Gliederung des Projektvideos und Stils aus den fünf Kapiteln des Projektfilms, von links oben nach rechts unten.

Die folgende Darstellung (Abb. 110) zeigt nochmals deutlich die räumliche Ausformung der entwickelten Leichtbau-Trägerelemente und skizziert die gestalterischen Möglichkeiten, die sich aus Mustern, OPV-Module, Spiegelung und Durchsicht ergeben können.



Abb. 110: Schauffassade mit räumlichen Leichtbau-Trägerelementen und Solarzellen (links). Durchblick und Spiegelung im Detail.

1.4.6. Erste Abschätzung Life Cycle / CO₂-Äquivalente für Sun Skins Trägersystem

Eine Eingangshypothese dieses Projektes war, dass sich der Materialeintrag eines folienbasierten Paneels zur Integration von OPV-Modulen verringern lässt, wenn räumlich ausgeformte Träger Elemente aus Polycarbonat anstelle von planaren Trägergeometrien aus Glas oder Polycarbonat verwendet werden. Dieses Kapitel liefert eine erste Abschätzung dazu – ein vollständiges Life Cycle Assessment (LCA) ist aufgrund des experimentellen, prototypischen Charakters des Projektes nur in Ansätzen (Phase A1 bis A3) möglich.

Das entwickelte Trägersystem basiert auf einem Verbund von zwei Lagen dreidimensional ausgeformter Polycarbonatfolien, von zwei Lagen thermoplastischem Polyurethan (TPU) Hotmelt-Kleber, sowie einer Lage organischer Photovoltaikmodulen (Abb. 111). Elementbreite bzw. Höhe sind 946 × 544 mm. Das Trägermaterial Polycarbonat kann transparent, transluzent oder deckend in unterschiedlicher Farbigkeit ausgeführt werden. Einsatzbereich sind Architekturprojekte, bei denen glasbasierte Photovoltaikmodulintegration auf Siliziumbasis aus funktionalen (Gewicht) oder ästhetischen Gründen (Transparenz) nicht infrage kommen.

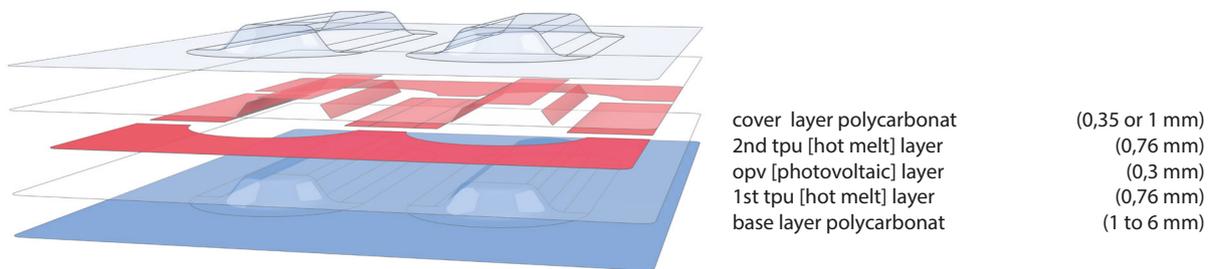


Abb. 111: Aufbau der Sandwich-Konstruktion des entwickelten OPV-Trägersystems.

Als Vergleichsbasis für die CO₂-Äquivalent-Berechnung wurden entsprechend zwei analog einsetzbare GIPV (gebäudeintegrierte PV) Verbundsysteme mit den gleichen Abmessungen gewählt, jeweils für eine Scheibengröße von 946 × 544 mm – was den Abmaßen der großen Elemente des Sun Skins Demonstrators der Bau München 2023 entspricht.

Der erste Vergleich wird zu einem folienbasierten Verbundsystem auf Polycarbonat-Basis gezogen, das jedoch aus planaren Elementen besteht. Für den zweiten Vergleich wird ein tradiertes Glas-Glas-Verbundsystem, ebenfalls mit planaren Scheiben, betrachtet.

Der innere Aufbau – doppelte TPU-Schicht und einlagige organische Photovoltaikmodule, wird für alle drei Systeme als identisch angenommen. Der Verbund der Scheiben wird bei allen drei Anwendungsfällen in der industriellen Anwendung im Autoklaven hergestellt (Schittich, 2006). Insofern kann der Umwelt-Fußabdruck dieser Elemente bzw. Prozesse für einen Vergleich außer Betracht bleiben – er fällt in jedem Fall an. Die Stärke der planaren Polycarbonatfolien wurde so ermittelt, dass die globale Verformung im Bereich des dreidimensional ausgeformten Elements liegt, dessen beiden Polycarbonat-Elemente eine Stärke von jeweils zwei Millimetern aufweisen (Abb. 112).

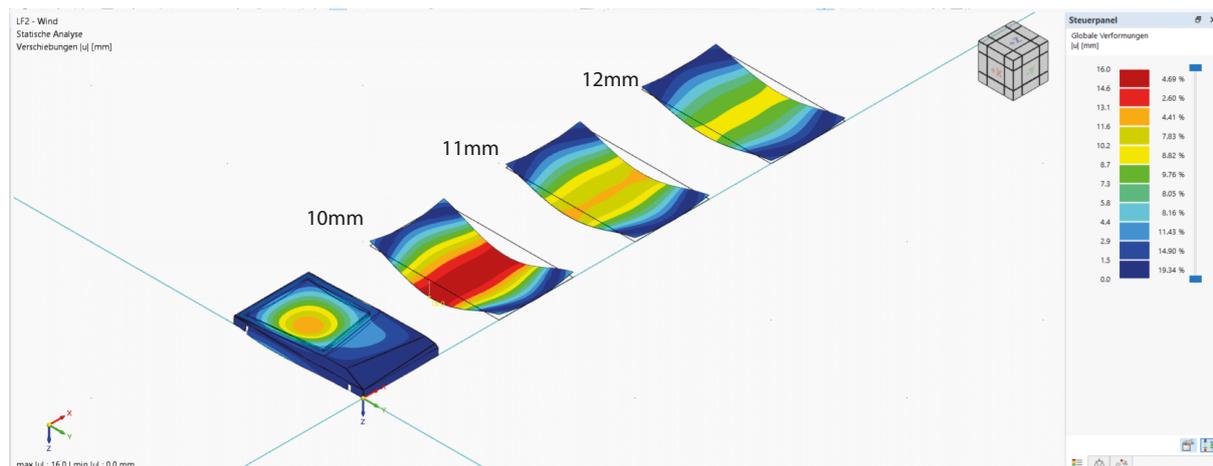


Abb. 112: Globale Verformung planarer Polycarbonat-Scheiben unterschiedlicher Stärke im Vergleich zum dreidimensional ausgeformten Träger bei identischer Last

Für alle Varianten wird eine gemittelte Windlast von 0,8 kN nach Norm Eurocode 1 (DIN EN 1991-1-4:2010-12, 2010) angesetzt. Dabei verformt sich die 3D-Form bei 4 mm Stärke um maximal 13 mm. Die planare Variante bei 10 mm Stärke um 16 mm, bei 11 mm Stärke um 12,6 mm und bei 12 mm um 9,7 mm. Näherungsweise trägt also eine planare Polycarbonatplatte von 11 mm Stärke die gleiche Last wie die dreidimensional umgeformte Prototypengeometrie mit 4 mm Stärke. Bei Glas ist die Stärkenermittlung so nicht möglich – hier erfordert die DIN 18008 für über Kopf angebrachte Verglasungen bei der simulierten Größe für Zweischeiben-Verbundglas mindestens 3 mm Stärke pro Scheibe, also insgesamt 6 mm für den Verbund.

Für die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks pro Element sind entsprechend näherungsweise 4 mm mit 11 mm starkem Polycarbonat, sowie 6 mm starkem Glasaufbau zu vergleichen.

Alle drei Varianten können aus herstellungstechnischer Perspektive mit Neumaterial, vollständig oder anteilig mit recykliertem Material ausgeführt werden. Für den Vergleich verwenden wir vom Projektpartner Işık (Işık, 2022) zur Verfügung gestellte Daten, die Polymethylmethacrylat (PMMA) sowie Polycarbonat (PC) aus der eigenen Produktlinie mit dem Werkstoff Glas vergleichen. In dieser Gegenüberstellung sind die CO₂-Anteile, nicht jedoch die CO₂-Äquivalenzanteile angegeben. Die CO₂-Emissionen pro kg Material liegen für PC bei 6,35 kg, für recykliertes PC bei 0,41 kg, bei Glas sind dies entsprechend 8,4 kg, für recykliertes Glas. Vergleichbare Datensätze (Oekobaudat, 2023) weisen für die CO₂-Äquivalent-Emissionen pro kg Material für Polycarbonat 9,3 kg und für Flachglas (ESG) 11,22 kg aus - in beiden Fällen etwa ein Drittel mehr. Auffällig ist, dass bei diesen nach dem DIN EN 15804 Standard (DIN EN 15804:2022-03, 2022)¹⁴ angelegten Datenblättern die Recyclingpotentiale drastisch geringer eingeschätzt werden als in den Daten des Industriepartners Işık. Die folgende Grafik zeigt die CO₂-Emission der genannten Materialien, umgerechnet auf die betrachteten Trägermodulvarianten (Abb. 113).

Grundsätzlich hat sich unsere Eingangshypothese bestätigt. Die Masse an emittiertem CO₂ bezogen auf das Basismaterial PC des Trägers ist beim dreidimensionalen Polycarbonat-Träger etwa um den Faktor 2,5 geringer als bei einem planaren Polycarbonat-Träger. Gegenüber Glas beträgt der Faktor 3,7. Auf der Vergleichsebene des recyklierten Materials sind die entsprechenden Faktoren 2,5 für PC und 9,7 für Glas.

(14)

Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021

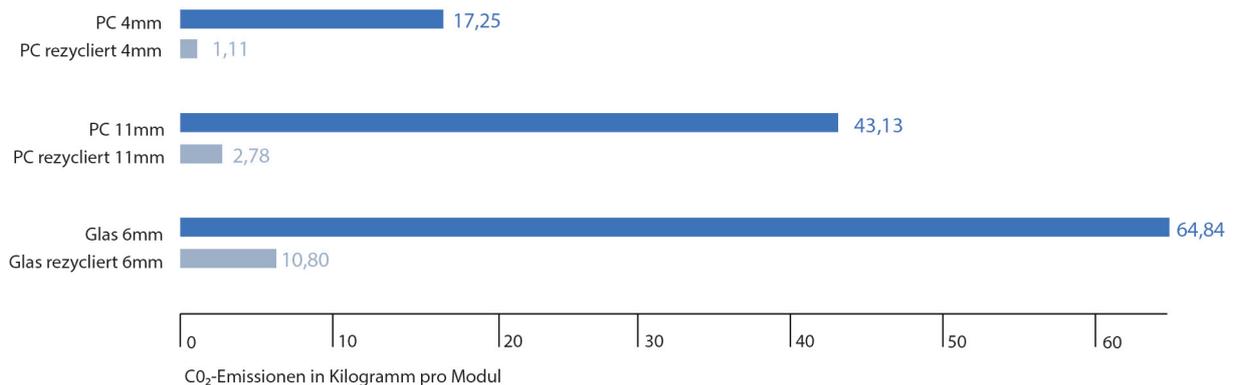


Abb. 113: Emissionen an Treibhausgas (CO₂) in Kilogramm pro Modul für das Basismaterial des Trägersystems: Dreidimensional ausgeformtes 4 mm dickes Polycarbonat im Vergleich mit 11 mm dickem Polycarbonat und 6 mm dickem Glas, jeweils aus Neumaterial und aus Rezyklat hergestellt

Typische Werte für thermoplastische Heißkleber (TPU) liegen bei etwa 2 bis 5 kg CO₂e pro kg Material (Industrieverband Klebstoffe e.V., 2014) – für das im Prototypen verwendete Produkt liegen keine Daten zum Global Warming Potential (GWP) vor. Bei gemittelten 3,5 kg CO₂e und einer Schichtstärke von 2 × 0,35 mm kommen pro realisiertem Modul noch etwa ca. 870 g CO₂e hinzu. Allerdings war bereits beim Prototypen die im Thermoformen erreichte Passgenauigkeit so hoch, dass in Serie wahrscheinlich mit halb so dicken TPU-Filmen gearbeitet werden könnte. Weitere Einsparpotenziale können sich aus der Optimierung des asymmetrischen Schichtaufbaus, genauer gesagt einer nur partiellen Verklebung der PC-OPV-PC Verbundes ergeben.

Für die organische Photovoltaik liegen die CO₂-Äquivalenz Werte in Gramm pro erzeugter Kilowattstunde bei 3 bis 15, bei 20 Jahren Lebensdauer (Heliathek, 2020). Bei monokristalliner, siliziumbasierter PV bei 43 bis 63 g bei 30 Jahren Lebensdauer (Umweltbundesamt, 2023). Die starken Schwankungen in den Werten liegen hauptsächlich am angesetzten Energiepayback. Bei siliziumbasierter PV sind der Herstellungsort und damit der verwendete Energiemix, sowie der mögliche Verzicht auf Aluminiumrahmen bei Glas / Glas-Sandwichlösungen wesentliche Faktoren. Im Laufe eines Jahres würde ein typisches OPV-Modul mit 6 % Wirkungsgrad auf der von uns gewählten Modulfläche im deutschen Durchschnitt rund 30 Kilowatt Strom erzeugen. Bei einem CO₂-Äquivalenzwert pro Kilowattstunde von (hohen) 15 g sind das CO₂-Äquivalenz-Emissionen von 0,463 kg im Jahr. Bezogen auf die komplette Lebensdauer von 20 Jahren entspricht dies 9,26 kg. Eine typische monokristalline Silizium-Zelle mit 16 % Wirkungsgrad würde auf die gleiche Zeit bezogen, bei identischer Stromerzeugung knapp 31 kg CO₂e emittieren. Der angesetzte g CO₂e Wert pro Kilowattstunde ist 50. Dass das Sun Skins Trägersystem durch die Faltung etwas weniger Fläche ausnutzen kann, ist dabei mit einem Faktor von 0,1 berücksichtigt.

In Summe ist das prototypisch entwickelte System nicht nur innerhalb vergleichbarer, architektonisch hochwertig und multifunktional nutzbarer Systeme der GiPV jenes mit der besten LCA-Perspektive. Organische Photovoltaik-Module zusammen mit dreidimensional ausgeformtem Polycarbonat und TPU liegen zusammen auch noch unter dem Global Warming Potential einer reinen Silizium-Zelle – ohne architektonischen Mehrwert.

Für eine weitergehende Analyse wären noch weitere Aspekte zu berücksichtigen. Solche mit potenziell negativen Effekten auf den CO₂e-Fußabdruck wären:

Die Herstellung der Tiefzugformen im Verhältnis zur Stückzahl der damit realisierten Elemente. Weiterhin kann geometrieabhängig eine etwas geringere Anzahl an Elementen pro Autoklav-Bestückung verarbeitet werden, ebenso kann sich ein höheres Transportvolumen durch die 3d-Formen ergeben, beides im Vergleich mit planaren Bauteilen.

Auch die Aufbringung von Grafiken auf dem Polycarbonat wäre in seiner Gesamtheit zu evaluieren. Ein untergeordneter Punkt, der noch systematisch zu untersuchen wäre, ist, inwieweit sich die optische Degradation (Vergilbung) von Polycarbonat auf den Wirkungsgrad der integrierten OPV-Module auswirkt.

Zusätzliche positive Effekte können sich beispielsweise aus der deutlich geringeren Masse des ‚Sun Skins‘ Trägersystems ergeben. Dies betrifft den Transport, aber auch die Lasten, die einer Gebäudestruktur eingebracht werden (Stichwort Gebäudebestand). Letzteres betrifft vorwiegend die Erschließung neuer Flächenpotentiale im Bestand durch den Gewichtsvorteil oder insgesamt durch zusätzliche architektonische Funktionen, wie passive Verschattung, was die Anforderungen an eine dahinterliegende Verglasung reduzieren würde.

1.4.7 Potenziale für weitere Materialeinsparungen

Die wirtschaftliche Rentabilität für die Herstellung der dreidimensionalen PC-Paneele im Tiefzugverfahren und der Sandwichkonstruktion im Autoklav-Prozess ist abhängig von der Anzahl der benötigten Werkzeuge. Somit steht die Wirtschaftlichkeit im direkten Verhältnis von benötigter Werkzeuganzahl zu produzierter Stückzahl.

Eine Erforschung von variablen Tiefzugwerkzeugen für eine höhere Materialeinsparung und höhere Gestaltungsvarianz scheint vielversprechend – insbesondere die gewonnenen Erkenntnisse beim Laminieren ohne Negativform sind eine gute Voraussetzung für die Entwicklung von variablen Tiefzugformen, da dann im Autoklaven nicht mehr für jedes Sun Skins Paneel eine Negativform benötigt würde.

Die Notwendigkeit, in der Fertigung für jeweils verschiedene Paneelformen je zwei Tiefzugwerkzeuge herzustellen, wurde als Hindernis für kleinere Stückzahlen identifiziert, da der Einsatz von Arbeitszeit, Rohmaterialien und Maschinenzeit sich zu höheren Nettoproduktionskosten addieren, die im Vergleich mit etablierten Produkten stehen.

Alternative Fertigungsansätze und Konstruktionsprinzipien können das Verhältnis Kosten pro Produkt verbessern, um die Vorteile der grünen Energiegewinnung und verbessertem GWP (Global Warming Potential) mittels OPV und dünnen PC-Folien auch für kleinere Serien und damit für eine generell größere Marktskalierung zu erschließen.

Neben der Optimierung des Materialverbrauchs durch ein variables Tiefzugwerkzeug ergibt sich aus der größeren Geometrievielfalt in Kombination mit der Materialität der Kunststoffe zusätzlich ein zu erforschendes Gestaltungspotential. Der Sun Skins Demonstrator der Bau München verdeutlicht anschaulich die Potenziale von transparenten, transluzenten oder deckende Kunststoffe in Kombination mit einer Bedruckung der Paneele.

Die FEM-Analyse sowie die Wegezugsversuche (1.3.12ff) haben gezeigt, dass 2 bis 3 mm starke PC-Folien auch ohne Verbund stabil genug sind.

In einem ersten Schritt wurde zum Beispiel untersucht, ob es möglich ist, auf eines der beiden Tiefzugwerkzeuge zu verzichten. Da diese im BAU München Prototypen zusammen ca. 10.000 € gekostet haben, würde sich hier eine potenzielle Einsparung von 5.000 € ergeben. Ein signifikanter Betrag bei kleinen Stückzahlen oder Einzelformen.

Daher wurde ein Ansatz untersucht, den Lastabtrag des Panels nur durch eine Tragfolie abzudecken und die zweite Folie nur partiell als Deckschicht zum Schutz der OPV-Module vor schädlichen Umwelteinflüssen zu verwenden. Für den Bau eines Prototyps wurden die OPV-Module auf der oberseitigen, planaren Fläche platziert. Eine planare Folie geringer Stärke (1 bis 2 mm) ist ausreichend, um die OPV-Module vollständig mittels TPU zu bedecken (Abb. 114)

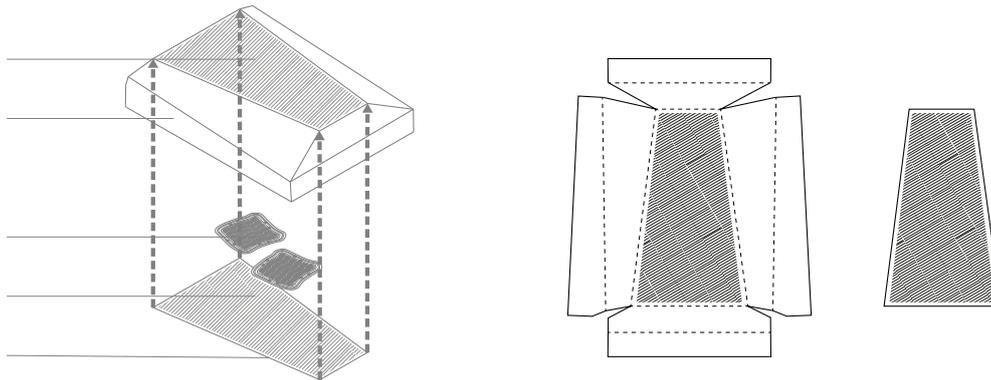


Abb. 114: Schematische Darstellung des Aufbaus mit selektiv platzierter Deckfolie ohne TPU(links). Vergleich der Abwicklungen Träger/Deckfolie. Schraffiert dargestellt ist der Überlappungsbereich(rechts).

Infolgedessen wurde ein Versuch aufgesetzt, um die Validität dieses Ansatzes zu überprüfen. Dafür wurde analog zu den vorangegangenen Formstudien (1.1.14) eine kleinere Modulgröße erstellt, die auf den Maßen des BAU 2023 Prototypenelements basierte.

Die finale Zielgröße der Grundfläche des Panels lag bei 460×340 mm.



Abb. 115: Tiefzugwerkzeug, Tiefzugvorgang und tiefgezogene Folie auf dem Werkzeug.

Für eine Prüfung der Realisierbarkeit dieser Herangehensweise wurde ein Prototyp seitens Işık gebaut. Zunächst wurde, bedingt durch die Größe der verfügbaren Tiefzugmaschine, die Gesamtgröße des ausgewählten Zielpaneels um 20 % reduziert. Nach Vortrocknen der 2 mm starken Polycarbonatfolie bei 110°C (500×460 mm) wurde die Deckfolie auf $180\text{--}190^\circ\text{C}$ erhitzt und über ein aus Aluminium gefertigtes Werkzeug tiefgezogen (Abb. 115). Nach dem Abkühlen der Folie wurde diese anschließend besäimt.

Danach wurde eine Folie gleicher Stärke auf die Geometrie der oberen Paneelfläche zugeschnitten. Diese entspricht einem Trapez mit den Maßen 320×190 mm. Die Länge der kurzen, parallelen Seite betrug 160 mm (Abb. 116).



Abb. 116: Dimensionen und fertig ausgeschnittene, planare Folie (Links, Mitte). Planare und tiefgezogene Folie in der Gegenüberstellung (rechts)

Abschließend wurden die Trägerfolie, OPV-Module und die partielle Deckfolie mittels zwei Schichten TPU im Autoklaven vakuumverpresst (Abb. 117). Im Versuch wurde erfolgreich demonstriert, dass aus fertigungstechnischer Perspektive die Nutzung kleinerer Deckfolien Vorteile mit sich bringt. Versuche in der Klimakammer, die Auskunft über die Langzeitwirkung v.a. im Hinblick auf den Feuchteschutz der OPV-Module bieten, waren vor Projektende nicht mehr möglich. Eine Aussage über die technische Validität der vereinfachten Fertigung ist somit nur bedingt möglich.

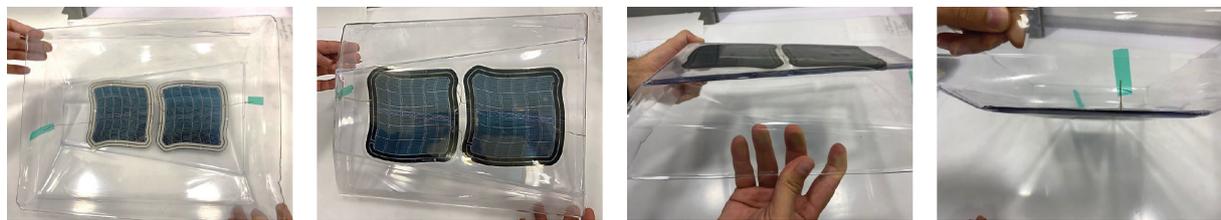


Abb. 117: Fertig verklebtes Element

Abhängig von der Position in der Fassade und den damit einhergehenden Grenzparametern wie Eigenverschattung und solarem Ertrag kann es sinnvoll sein, mehr als nur eine Fläche mit OPV-Modulen auszustatten. In diesem Fall erhöht sich die Anzahl der einzelnen Deckfolien und Arbeitsschritte, was eine genaue Betrachtung zwischen zeitlichem Aufwand in Arbeitsstunden für das Einbringen der einzelnen Deckflächen und der tatsächlichen Materialersparnis durch die Vereinfachung des Prozesses erfordert.

Des Weiteren ergibt sich Einsparpotential, auf den Prozess des Laminierens im Autoklaven zu verzichten. Neben dem hohen Bedarf an Einwegmaterialien für Vakuumsack, Trennfolien und Vliese (vgl. 1.4.2) würde dies auch den hohen Energieverbrauch des Autoklavs einsparen.

Hierzu gibt es die Überlegung, anstelle des TPU ein Epoxid- oder Polyesterbasierende UV-aktivierte Klebstoffe zu verwenden. Diese sind in der Regel wasserundurchlässig und könnten somit die gleiche Funktion wie das TPU erfüllen. Eine gepresste Verklebung der Trägerfolie mit der von innen anliegenden Deckfolie und den dazwischenliegenden OPV-Modulen wäre so auch ohne Autoklaven möglich.

Somit ergeben sich aus diesem Ansatz folgende Vorteile, die in einem zukünftigen Projekt zu validieren wären:

- Weniger Energieverbrauch im Vergleich zum Autoklav
- Weniger Materialverbrauch durch den Einsatz geringerer Mengen Polycarbonats sowie weniger Verbrauchsmaterialien im Autoklavivorgang.
- Kürzere Produktionskette und geringerer Produktionsaufwand

1.5. Arbeitspaket 5

1.5.1. Fazit

Im Rahmen des Adaptive Sun Skins Projekt wurde ein folienbasiertes, räumlich ausgesteiftes Trägersystem im Leichtbau zur Integration von organischen PV-Modulen erforscht, das die gestalterischen, ökologischen und funktionalen Vorteile der OPV-Technologie für die Gebäudeintegration ausnutzt. Die für dieses Projekt eingangs festgestellte Forschungslücke erforderte die Ermittlung von Materialkennwerten sowie die Identifikation und Adaption von geeigneten industriellen Fertigungsprozessen, nachgewiesen durch die prototypische Entwicklung und Bau eines Demonstrators für ein solches Trägersystem. Die vielfältigen Randbedingungen (Ausrichtung zur Sonne, Statik, unterschiedliche Einbausituationen, geometrische und materialspezifische Bedingungen) informieren ein spezifisch konfiguriertes digitales Planungswerkzeug, das die Planer im Bauwesen beim Entwurf von gebäudeintegrierten OPV-Fassaden unterstützt.

Im Folgenden wird die erfolgreiche Umsetzung der Projektziele kritisch bewertet und weiterer Forschungsbedarf identifiziert. Als Referenzbauteil dient eine planare Verbundglaskonstruktion zur Integration von OPV.

Materialsystem und Thermoplastisches Umformen

Das eingesetzte Material Polycarbonat (PC) konnte erfolgreich in ausreichender Präzision – auch für die Ausbildung von Sicken und kleinteiliger Detaillierung – im Tiefziehverfahren präzise genug umgeformt werden, ohne an Transparenz und optischer Qualität zu verlieren. Das Material Polycarbonat eignet sich von den recherchierten Kunststoffen aufgrund seiner UV-Stabilität und Brandschutzeigenschaften am besten in der Gruppe für den Einsatz in der gebäudeintegrierten Photovoltaik (GiPV).

Durch die 3D-Verformung findet eine Streckung des PC entlang der z-Achse statt. Wir haben eine Verminderung der Wandstärke von bis ca. 50 % bei unseren Tiefzugversuchen beobachtet. Da sich bei der Längs-Verformung von Thermoplasten die ungeordneten Polymere parallel zur Zugrichtung ausrichten, konnten keine signifikanten Festigkeitsverluste beobachtet werden (Wibbeke, 2014). Für die Herstellung des Verbundbauteils durch Laminieren hatte die Längs-Verformung der Seitenwangen keinen signifikanten Einfluss, da die eingesetzten TPU in der Lage waren, evtl. Unebenheiten zwischen den beiden PC-Trägerlagen auszugleichen.

Die statische Belastbarkeit der Bauteile wurde durch die durchgeführten Wegezugsversuche zusätzlich bestätigt. Auf eine weitere vertiefte Betrachtung und systematische Erforschung wurde daher verzichtet.

Für den Formenbau (Werkzeuge) werden zwei gefräste Negativformen aus hochfestem Schaum benötigt, was einen gewissen Aufwand bei Kleinserien bedeutet, aber bei größeren Stückzahlen vernachlässigbar ist. Durch den Einsatz industrieller Prozesse lassen sich so auch größere Stückzahlen (> 1000 Stück) bei geringen Kosten herstellen. Die Tiefzugprozesse lassen sich gut auf den Maßstab von Gebäudefassaden anwenden, wie der Demonstrator im Kapitel 1.4 sehr anschaulich verdeutlicht.

Herstellung des Verbundbauteils

Mithilfe der Firma Inglas GmbH konnten in Kleinserie erfolgreich 13 Testpaneele inklusive funktionsfähiger OPV-Module mit nur 2 mm starkem, thermogeformtem PC und zwei Lagen thermoplastischem Polyurethan (TPU) verbunden werden. Die Ergebnisse sind blasenfrei und haben insgesamt eine hohe optische Oberflächenqualität. Die OPV Inlays – inkl. notwendige Verdrahtung – konnten erfolgreich zu einem Sandwich aus PC 2 mm – TPU 0,76 mm – OPV – TPU 0,76 mm – PC 2 mm verbunden werden.

Eine Ausbildung von zusätzlichen Sicken in der Globalform bedeutet einen zusätzlichen Aufwand in der Erstellung und Vorbereitung des Verbundes. Hier bietet sich eine Fall-zu-Fall-Abwägung an, um zu beurteilen, ob die zusätzliche Materialeinsparung den Aufwand in der Herstellung rechtfertigt.

Die 3D-gefrästen Tiefzugformen dienen für das Laminieren der Verbundbauteile ebenfalls als Negativform. Um die Schrumpfung des Tiefzugprozesses zu berücksichtigen, mussten diese im Vorfeld auf eine Größe von ca. 99 % skaliert und nochmals gefräst werden. Neben dem hohen Transportgewicht wurde für die Herstellung jedes Verbundbauteils eine Negativform benötigt. Daher wurde ebenfalls ein Verbundbauteil ohne Negativform direkt im Vakuumsack erfolgreich laminiert. Für die Serienproduktion besteht hier weiterer Forschungsbedarf durch systematische Untersuchungen des Laminieren im Autoklav zur Herstellung der Verbundbauteile ohne Negativformen.

Statische FEM-Simulation

Die vereinfachten FEM-Simulationen in Karamba3D© haben sich als aussagekräftig genug erwiesen, um unterschiedliche Geometrievarianten untereinander zu vergleichen und den Versagensfall abschätzen zu können.

Für alle Simulationen wurde eine realistische Windlast angenommen. Die gewählten Sicherheitsbeiwerte wurden bewusst hoch gewählt, was aber eine Optimierung der Formen im Grenzbereich ausschloss. Dafür konnte der Arbeitsablauf belastbar innerhalb einer digitalen Prozesskette implementiert werden. Ebenfalls konnten hiermit keine Detailmodellierung der Sicken oder Kantenradien der Paneele betrachtet werden. Die Performanz der Sicken und Detaillierungen wurde daher systematisch in der Software RFEM© 6 betrachtet und die besten Ergebnisse in der parametrischen Modellierung berücksichtigt.

Bei der FEM Simulation mittels RFEM© wurde deutlich, dass eine Betrachtung der Bauteile über die auftretenden Schubspannungen $\{\sigma\}$ angemessener ist als ein Vergleich der Spannungsgrenzen N/mm^2 und Durchbiegung (mm). Hintergrund ist die gute Verformbarkeit und Rückstellkräfte des Materials Polycarbonat. Bei hohen Lasten findet zwar eine große Verformung statt, die sich bei Wegfall der Last aber auch wieder zurückbildet. Daher schien eine Betrachtung über die max. zulässige Schubspannung $\{\sigma\}$ bei der die OPV-Module noch Strom liefern als Kennwert für die Bemessung sinnvoller. Zur Grenzgrößenermittlung wurden zusätzliche Wegezugsversuche durchgeführt.

Statische Validierung durch Biegezug- und Wegezugsversuche

Um die statische Performanz im Grenzbereich zu testen und zur Überprüfung der digitalen Simulationen, wurden zusätzlich systematische physische Versuchsreihen durchgeführt:

- Zugversuch zur Ermittlung der maximal zulässigen Schubspannung
- Biegezugversuch für den Versagensfall für ein Bauteil des Demonstrators

Die Zugversuche mussten bei 29,5 kN bei einer Wegstrecke von 150 mm abgebrochen werden, da die Teststreifen bei dieser Belastung aus den Spannbacken gerutscht waren. Es ist anzunehmen, dass hier mit einem angepassten Versuchsaufbau wesentlich höhere Werte erreicht werden können, da die laminierten OPV-Module noch voll funktionsfähig waren.

Beim Biegezugversuch ist bei 2,5 kN Last der Druckstempel aus MDF gebrochen. Auch hier ist anzunehmen, dass deutlich höhere Windlasten bei den verwendeten Materialstärken möglich sind.

Zusammenfassend betrachtet haben die Versuche die Belastbarkeit des Forschungsansatzes bestätigt. Durch

Lagen 2 mm Polycarbonatfolie und müssten für den Fassadeneinsatz eine Windlast von ca. 1 kN aufnehmen – dies wurde durch die Tests um den Faktor 2,5 übertroffen wurde. Daher ist anzunehmen, dass eine weitere Materialreduktion realisierbar ist. Für eine zusätzliche Materialoptimierung wären weitere physische Versuche zur statischen Kennwertermittlung und für die Kalibrierung der digitalen Simulationen notwendig.

Digitales Planungstool & Gestaltung

Im entwickelten digitalen Planungstool konnte erfolgreich die parametrische Geometrieerzeugung mit der solaren Analyse und statischen Simulation verknüpft werden. Für Planer steht somit ein Tool zur Verfügung, dass innerhalb der Rhinoceros3D© und Grasshopper© Plattform den Entwurf einer großen Anzahl an Gestaltungsvarianten und deren Bewertung innerhalb einer durchgängigen digitalen Prozesskette ermöglicht. Das Projektziel, möglichst einfach unterschiedliche Geometrien für die Sun Skins Paneele zu erzeugen, ist daher gegeben.

Überdies verdeutlicht die zusätzliche Bedruckung des 1:1 Demonstrators das Potenzial von Sun Skins Fassaden, den Lichtdurchgang (Fc-Wert) sowie Ein- und Ausblicke individuell zu gestalten.

Nachhaltigkeit

Die CO₂-Äquivalente Abschätzung zeigt eine Materialeinsparung beim dreidimensionalen Polycarbonat Träger etwa um den Faktor 2,5 im Vergleich zu einem planaren Polycarbonat Träger sowie um den Faktor 3,7 gegenüber Glas. Diese Werte sind eine konservative Abschätzung aufgrund der vorhandenen Datenlage. Die Werte dürften sich durch eine weitere Optimierung durch zusätzliche statische Versuche nochmals verbessern.

Ausblick

Die vereinfachte Berechnung der CO₂-Äquivalente und statischen Tests bestätigen die Validität des gewählten Forschungsansatzes für die Integration von OPV-Modulen in folienbasierte, räumlich ausgesteifte Trägersysteme aus Polycarbonat.

Um die wirtschaftliche Tragfähigkeit des Ansatzes, insbesondere für Kleinserien, zu verbessern sind die Versuche zum Vakuumpressen im Autoklaven ohne Negativform vielversprechend. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Umformung der Folien ohne zusätzliche Werkzeuge. Diese sollte mit der systematischen Erforschung der aufgezeigten Gestaltungsvarianz von (Bio)Kunststoffen erfolgen.

2 Ergebnisverwertung

Das große Interesse auf der Bau München 2023 am Sun Skins Projekt verdeutlicht den Bedarf an innovativen und gestaltbaren Lösungen zur Systemintegration von (organischer) PV im Fassadenbereich. Weitere öffentlichkeitswirksame Ausstellungen wurden im Jahr 2022 auf Einladung auf der MS Wissenschaft durchgeführt. Im Nachgang wurden die Forschungsergebnisse des Sun Skins Projekt im Rahmen des IBA (Internationale Bauausstellung) Festivals #1 in Stuttgart / Backnang gezeigt (Abb. 118) und in einem Fachvortrag vorgestellt. Projektergebnisse wurden im Rahmen eines Papers präsentiert.



Abb. 118: Präsentation der Forschungsergebnisse auf dem IBA '27 Festival

Der gezeigte Demonstrator garantierte die Sichtbarkeit des Vorhabens im Bauwesen und im PV-Sektor. Zugleich fand eine Rückkopplung mit der Öffentlichkeit statt, die eine fundierte Basis für die Akzeptanz innovativer und nachhaltiger Lösungen zur urbanen Energiegewinnung schafft. Untermauert wurden diese Erfolgsaussichten durch eine wissenschaftliche, peer-review Veröffentlichung und Konferenzbeitrag auf der eCAADe Konferenz an der TU Graz (Loho, Stein, Carl, Schein, 2023).

Durch die Zusammenarbeit im Sun Skins Projekt wurden Kontakte und Vernetzungen zwischen und innerhalb deutscher und internationaler Unternehmen und Forschungseinrichtungen im Bauwesen gefördert. Perspektivisch kann die folienbasierte GiPV Integration als Leichtbaualternative zu bestehenden PV-Systemen erschlossen werden. Die Entwicklung ultraleichter, transparenter oder semitransparenter Sun Skins Module wird die PV-technische Erschließung des urbanen Raumes und damit eines bedeutenden Flächenpotenzials ermöglichen. Durch die Zusammenarbeit im Projekt konnten die Netzwerke der verschiedenen Partner zusammengeführt werden, um in Zukunft weitere Forschung mit fundiertem Know-how gemeinsam zu begleiten. Die Ergebnisse und Daten (insbesondere die digitalen Planungstools) können für Folgeprojekte einfließen und die Entscheidungsfindung für den Entwurf von GiPV Fassaden erleichtern. Durch die Industriebeteiligung können die Projektergebnisse, die in Zusammenarbeit mit den Forschungseinrichtungen erzielt wurden, direkt in die weitere Entwicklung der Firmen einfließen und langfristig der CO₂-Einsparung und Anpassung an den Klimawandel zugutekommen.

3 Mitwirkende und Danksagung

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr. Timo Carl
Prof. Dr. Markus Schein
Dipl. Ing. Roger Loho
Dipl. Des. Max Stein

Weitere Mitwirkende

BA Pascal Nünninghoff
BA Samuel Gemeinder
BA Svenja Bettermann
Silas Tranter
Julia Bender

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Agnes Weilandt für ihre Unterstützung und Beratung bei der Konzeption der statischen Simulationen.

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Isik Plastik San. ve Dis Tic. Paz. A.S.
Serkan İşmar, Burak KOÇAK, Şenay İskender
G.O.S.B. Ihsan Dede Cad. No. 101
41400 Gebze-Kocaeli

ASCA GmbH
Dr. Ralph Pätzold, Hermann Issa, Dr. Sebastian Meier
Steigweg 24, Building 12
97318 Kitzingen, Germany



4 Anhang

4.1. Literaturverzeichnis

- Abts G. (2016) Kunststoff-Wissen für Einsteiger, München: Carl Hanser Verlag
- Albers A. (2005) Entwicklung einer FEM-basierten Methode zur Gestaltung von Sicken für biegebeanspruchte Leitstützstrukturen im Konstruktionsprozess, <https://docplayer.org/80649659-Entwicklung-einer-fem-basierten-methode-zur-gestaltung-von-sicken-fuer-biegebeanspruchte-leitstuetzstrukturen-im-konstruktionsprozess.html>, [abgerufen 07.12.2021]
- Bauer J., Blickle P., Ehmann A., Endt C., Erdmann E., Grefe-Huge C., Peter V., Stahnke J., Tröger J., Wahls R., Stehle A., Zeit (2023) Energiemonitoring Deutschland, <https://www.zeit.de/wirtschaft/energiemonitor-deutschland-gaspreis-spritpreis-energieversorgung>, [abgerufen 12.09.2023]
- Bundesregierung (2023) Photovoltaik-Strategie, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/photovoltaik-strategie-2188542>, [abgerufen 12.09.2023]
- Bundeszentrale für politische Bildung (2016) Pareto-Optimum, bpb.de, <https://www.bpb.de/kurzknapp/lexika/lexikon-der-wirtschaft/20401/pareto-optimum/>, [abgerufen am 10.09.2023]
- Carl, T., Weilandt, A., (2022) From Sheet to Folded Plate Structure - Design & build investigations with an interdisciplinary student team, Pak, B., Wurzer, G., Stouffs, R. (eds.), Co-creating the Future: Inclusion in and through Design - Proceedings of the 40th Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2022) - Volume 2, Ghent, 13-16 September 2022, pp. 517–524
- Costa, A., Nannicini, G. (2018) RBFOpt: an open-source library for black-box optimization with costly function evaluations. *Math. Prog. Comp.* 10, 597–629, <https://doi.org/10.1007/s12532-018-0144-7>
- Covestro (2024) Hotmelt adhesive films, https://solutions.covestro.com/-/media/covestro/solution-center/brochures/pdf/platilon_bayfol-hot-melt-adhesive-films-brochure.pdf [abgerufen 03.03.2024]
- DIN EN 15804:2022-03 (2022) Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Berlin: Beuth-Verlag
- DIN EN 1991-1-4:2010-12 (2010) Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten, Berlin: Beuth-Verlag
- Dlubal Software GmbH (2022) <https://www.dlubal.com/en/products/rfem-fea-software/>
- Engelsmann, S., Spalding, V. and Peters, S. (2010) *Plastics in Architecture and Construction*, Basel: Birkhäuser Verlag
- Faircloth, B. (2015) *Plastics Now - On Architecture's Relationship to a Continuously Emerging Material*, Abingdon: Routledge
- Flexogravur GmbH (2022) https://www.flexogravur.de/de/flexo/glossar?seite=glossar_r.php, [abgerufen 04.04.2022]
- Galeb, A. Zainab, F. (2011) Optimum design of reinforced concrete waffle slabs, *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING* Volume 1, No 4, 2011 1
- Gewerbemuseum Winterthur (2011) Polycarbonat, https://material-archiv.ch/de/ma:material_20, [abgerufen 17.08.2022]
- Girrbach (2021) Technisches Datenblatt VOLUMENVERGUSS V4417, https://www.girrbach.net/images/Produkte/Datenblaetter/Volumenverguss_V4417_TDB.pdf, [abgerufen am 25.09.2023]

- Hartwig J. und Zeumer M. (2010) Umweltwirkungen von Kunststoffen in: Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M. & Lienhard, J. (2010) Atlas Kunststoffe + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion. München: DETAIL Verlag, S. 129
- Hoenow G., Meißner T. (2016) Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau, München: Carl Hanser Verlag
- Industrieverband Klebstoffe (2023) Typische Werte, https://www.klebstoffe.com/wp-content/uploads/2020/04/M-RS_2014-29_Typische_PCF_Werte_engl_v3_PDFv2_final_.pdf, [abgerufen 12.09.2023]
- Işık (2022) private Kommunikation, angegebenen Quellen für Polycarbonat bzw. Glaswerte: Plastic Europe, "Eco-profiles of the European Plastics Industry POLYCARBONATE" Green Ration Book, "Carbon footprint of 1kg General Glass"
- Kalweit A., Paul C., Peters S., Wallbaum R. (2006) Handbuch für technisches Produktdesign, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag
- Klein, P. W. (2009) Fundamentals of Plastics Thermoforming, Basel: Springer-Verlag
- Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M. & Lienhard, J. (2010) Atlas Kunststoffe + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion. München: DETAIL Verlag, S.45, <https://doi.org/10.11129/detail.9783955530037>
- Krauß A. (2017) Optimierte Sickinggestaltung im Konstruktionsprozess dünnwandiger Bauteile, Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz
- Kunststoffe.de (2023) Thermoformen | Umformungsverfahren Thermoplasten. (n.d.). Kunststoffe: Nachrichten, Stellenmarkt, Produkte Für Die Kunststoffindustrie. <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/thermoformen-254114>, [abgerufen am 10.09.2023]
- Maschinenbau-Wissen (2009) Thermoformen von Kunststoff - Verfahrens-Ablauf & Funktionsweise, <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/428-thermoformen>, [abgerufen 04.04.2022]
- Müller S., Kube S., Heliateg GmbH (2023) Truly Green Energy. https://www.heliateg.com/fileadmin/user_upload/Rebranding/pdf_Dokumente/2022-10_Heliateg_Truly_Green_Energy_Ultra_Low_Carbon_Footprint_REV3.pdf. [abgerufen 12.09.2023]
- Oehler, G., (1966) Gestaltung Gezogener Blechteile - Konstruktionsbücher, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag
- Oehler G., Weber A. (1972) Steife Blech- und Kunststoffkonstruktionen, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag
- Ökobau (2023) https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3f617412-e411-4b33-b81f-27e1ec0a6545&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de, [abgerufen 19.09.2023]
- Petersen, C. (1982) Statik und Stabilität der Baukonstruktionen : elasto- und plasto-statische Berechnungsverfahren druckbeanspruchter Tragwerke: Nachweisformen gegen Knicken, Kippen, Beulen, Wiesbaden: Vieweg Verlag, S. 790-807
- Reitter G., Bretten K. (2013) Leichtbau durch Sicken, <https://4ming.de/de/forming-handbuch/leichtbau-durch-sicken-fachbuch>, [abgerufen 07.12.2021]
- Robert McNeel & Associates (2023) <https://www.rhino3d.com/>
- Sadeghipour Roudsari, M., Pak, M. (2013) „Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design.“ In: Proceedings of the 13th International IBPSA Conference Held in Lyon, France Aug 25–30th, http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_2499.pdf
- Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W. (2006) Glasbau Atlas, Basel: Birkhäuser Verlag, <https://doi.org/10.11129/detail.9783034615532>, S. 69

Schwarz, O., Ebeling, F. W., Schirber, H., Hubert, H., Schlör, N. (2002) Kunststoffkunde. Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere, Würzburg: Vogel Communications Group

Schwarzmann P. (2016) Thermoformen in der Praxis, München: Carl Hanser Verlag

Splitterwerk (2009) https://splitterwerk.at/database/main.php?mode=view&album=Buildings&pic=06_Frog_Queen.jpg&dispsize=512&start=0, [abgerufen am 11.09.2023]

Sichert (2019) Polycarbonat, https://www.sichert.com/wp-content/uploads/2019/10/Fact_PC_DE.pdf, [abgerufen 17.08.2022]

SIMONA AG (2018) Thermoformen, Warmformen, Biegen, https://www.simona.de/fileadmin/user_upload/Medien/Mediacenter/Verarbeitungshinweise/work.info__Thermoformen__Warmformen__Biegen.pdf, [abgerufen 22.03.2022]

Swissplast (2022) Kunststoff-Tiefziehen, <https://www.swissplast.com/technik/kunststoff-tiefziehen>, [abgerufen 04.04.2022]

Umweltbundesamt (2023) Photovoltaik, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik#photovoltaik>, [abgerufen 12.09.2023]

Wibbeke A. (2014) Stretching of Polycarbonate, Universitätsbibliothek Ilmenau

Wikipedia (2022) Faltwerk, <https://de.wikipedia.org/wiki/Faltwerk>, [abgerufen am 10.09.2023]

Wikipedia (2022) Polycarbonate, https://de.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate#cite_note-roempp-3. [abgerufen 17.08.2022]

Wortmann, T. (2017) Opossum: Introducing and Evaluating a Model-based Optimization Tool for Grasshopper, <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2017.283>

4.2. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Entwickeltes OPV-Trägersystem, beispielhaft für eine Pfosten-Riegelfassade realisiert, auf dem Zukunft Bau Stand bei der Bau München 2023.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 2: Digitale Darstellung der Innenseite des Demonstrators auf der Bau München, die die Gestaltbarkeit des Systems durch aufgedruckte Muster in verschiedenen Formen und Skalierungen illustriert.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 3: Dünne Folien tiefgezogen als Verpackungsmaterial für z.B. Lebensmittel.
(links) <https://www.pack4food24.de/Salatschale-rPET-klar-oval-250ml-mit-anhaengendem-Deckel-600St>
(mitte) <https://www.blisterverpackung.de/siegelblister-siegelhauben>
(rechts) <https://www.pack4food24.de/Deckel-transparent-RPET-fuer-Teller-B3-rund-600St>.
[abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 4: (von links nach rechts) Holzschliffschale, kompostierbare Schale aus Pulp, Spritzgussteile auf Zellulose-Basis.
(links 1) <https://frugema.at/1618/>
(links 2) <https://www.spree-verpackung.de/p/bepulp-schale-mit-drei-faechern-900ml-pul49348>
(rechts 1) <https://www.arburg.com/de/de/loesungen/nach-material/bio-kunststoffe/>
(rechts 2) <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/naturfaser-spritzguss>
[abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 5: Kofferschalen der Marke Samsonite, in unterschiedlichen Gestaltungsformen
(links 1) https://www.samsonite.de/upscape-spinner-75-28-exp-blue-nights/143110-2165.html?cgid=luggage_hardside-suitcases
(mitte) <https://www.samsonite.de/c-lite-spinner-86cm--midnight-blue/122863-1549.html>
(rechts) https://www.samsonite.de/proxis-spinner-75cm--silber/126042-1776.html?cgid=luggage_hardside-suitcases
[abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 6: (links) Herstellung einer Kofferschale aus Kunststofffolie. (mittig, rechts) Details zur Gestaltung und Aussteifung von Koffern.
(links 1) <https://www.idowa.de/der-titan-aus-hauzenberg-899601.html>
(mitte) https://www.samsonite.de/stackd-spinner-68cm--faecher-navy/134639-1596.html?cgid=luggage_hardside-suitcases
(rechts) https://www.samsonite.de/neopod-spinner-expandable-sl.-out-pouch-55cm--midnight-blue/139872-1549.html?cgid=luggage_hardside-suitcases
[abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 7: Unterschiedliche Typen von Kofferschalen; (links) Schale mit Sicken zur Aussteifung, (mittig) Schale mit Aussteifungsrippen, (rechts) Schale aus Segmenten mit aussteifenden Alu-Schienen. (links) <https://www.koffermarkt.com/bwh-koffer-mobil-teleskopisch-transportkoffer-schwarz-55-cm-2-rollen/> (mittig) <https://www.koffermarkt.com/bwh-koffer-powerpack-transportkoffer-typ-2-mit-2-rollen/> (rechts) <https://www.koffermarkt.com/bwh-koffer-robust-case-transportkoffer-typ-4-mit-2-rollen/> [abgerufen 27/04/2024]

- Abb. 8: Darstellung der verschiedenen Zonen einer Kofferschale.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 9: (links) gefaltetes/ gebördeltes Blech, (rechts) Blech mit Wölb-Struktur vollflächig.
(links) <http://www.bosy-online.de/Blechbearbeitung/Boerdeln.htm>
(rechts) <https://www.raumprobe.com/de/material/edelstahldekorblech-bestens-fuer-den-aufzugbau-geeignet-metall--11098-11-10455>
[abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 10: (links & mittig) verschiedene Blech-Bauteile mit unterschiedlich ausgeprägten Stanz-Nibbeln, (rechts) Pressteil aus Blech mit zugehöriger Pressform
(links) <https://www.gmb-blech.de/blechbearbeitung/leistungen/stanzen-nibbeln-umformen.php>
(mittig) <https://reku.at/technologien/laser-stanzen-kombi>
(rechts) <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/praezise-presse-unterstuetzt-das-schmierstofffreie-tiefziehen-a-1021022/>
[abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 11: (links) Kotflügel links vorn; (rechts) Karosserie Blech
(links) <https://shop.ahw-shop.de/original-vw-touran-1t-kotfluegel-links-vorn-karosserie-blech-1t0821021a>
(rechts) [https://umformtechnik.net/blech/Inhalte/Fachartikel/40-leichtere-Bauteile-durch-Warmumformung/\(gallery\)/3](https://umformtechnik.net/blech/Inhalte/Fachartikel/40-leichtere-Bauteile-durch-Warmumformung/(gallery)/3)
[abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 12: Unterschiedliche Ausführungen von Strukturblechen
(links) https://www.profilbleche.net/SyMedien/de/2375_Profilbleche_aluminium.jpg
(rechts) <https://www.schwedenbleche.de/trapezblech/profil-29283>
[abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 13: Unterschiedliche Ausführungen von Strukturblechen
(links) <https://www.instructables.com/Curved-Paper-Folding/>
(rechts) <https://cutoutfoldup.com/1601-curved-folding.php>
[abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 14: Sicken-Checklist mit Detailabbildung
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 15: Schematische Darstellung des Tiefzugprozesses.
Zeichnung nach: Klein, P. W. (2009) Fundamentals of Plastics Thermoforming, Basel: Springer-Verlag,
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 16: (links) Passgenaue Werkstück-Seiten beim Tiefzug; (mittig) Zonen der Verformung; (rechts) Planaufbau
Zeichnung nach: Klein, Peter W., Fundamentals of Plastics Thermoforming (2009), Springer Cham
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 17: Planaufbau und Zusammensetzung aller Komponenten im Bauteil.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel

- Abb. 18: Zusammensetzung aller Komponenten im Autoklav.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 19: Exemplarische Abwicklung der TPU-Schicht/ Hotmelt bei einer Beispiel-Geometrie
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 20: Klebeversuche mit Ultraviolett aushärtendem Klebstoff von Işık -Plastik
Eigene Darstellung © Isik-Plastik
- Abb. 21: Schematische Darstellung des Aufbaus mit einer vollflächigen TPU- und PC-Schicht.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 22: Schematische Darstellung des Aufbaus mit partieller TPU- und PC-Schicht.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 23: Schematische Darstellung des Aufbaus mit partieller TPU- und PC-Schicht, in Mulde abgesetzt.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 24: Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M. & Lienhard, J. (2010) Atlas Kunststoffe + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion. München: DETAIL Verlag, S. 69
- Abb. 25: Thermogeformte Halbschale aus Polycarbonat (Pilotenkanzel Rennmotorboot)
<https://www.alfab.com.au/wp-content/uploads/2020/06/New-Project.png>
[abgerufen am 03.03.2024]
- Abb. 26: Novartis-Pavillion in Basel
(links) <https://www.tagesanzeiger.ch/novartis-baut-auf-seinem-campus-cafe-und-museum-fuer-ganz-basel-857308947167>, [abgerufen 27.04.2024]
(rechts) <https://www.kimya.fr/de/kimya-unterstuetzt-asca-dabei-den-novartis-pavillon-zu-erleuchten/>, [abgerufen 27.04.2024]
- Abb. 27: Solar Decathlon Europe 21/22 in Wuppertal
(links) <https://www.photovoltaik.eu/bipv/solar-decathlon-asca-kooperiert-mit-collab-der-uni-stuttgart>
(rechts) <https://www.asca.com/de/projekte/solar-decathlon-europa-21-22-asca-kooperiert-mit-dem-deutschen-teilnehmer-collab/#images-2>, [abgerufen 27/04/2024]
- Abb. 28: Hartwig J. und Zeumer M. (2010) Umweltwirkungen von Kunststoffen in:
Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M. & Lienhard, J. (2010) Atlas Kunststoffe + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion. München: DETAIL Verlag, S. 129
- Abb. 29: Positiv- und Negativverformung, nach: Schwarzmann P. (2016) Thermoformen in der Praxis, München: Carl Hanser Verlag
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 30: Verstreckung, nach: Reitter G., Bretten K. (2013) Leichtbau durch Sicken, <https://4ming.de/de/forming-handbuch/leichtbau-durch-sicken-fachbuch>, [abgerufen 07.12.2021]
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel

-
- Abb. 31: Visualisierungen verschiedener Auflagersituationen für die Fassadenanbindung
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 32: (links oben) zeigt eine an Seilen montierte Punkthalterung, (links unten) ist ein Pfosten-Riegel System zu sehen, (mittig / rechts) unterschiedliche Montagevorschläge
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 33: Angenommene Auflagerkonfiguration für die vereinfachte FEM-Simulation mit Los- und Festlagern
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 34: Die angenommene Auflagerkonfiguration für die vereinfachte FEM-Simulation. Zu sehen sind die unterschiedlich eingestellten Fest –und Lospunkte sowie Flächenlast.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 35: Eine rechteckige Folie mit den Maßen 1.60x0.8m wird simuliert; eine dreidimensional geformte Folie mit den gleichen Maßen wird simuliert.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 36: Simulation von drei Geometrietopologien (hintere Reihe) und unterschiedlichen Randausbildungen (vordere Reihe) .
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 37: Übersicht der geometrische Gestaltungsvarianten
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 38: Exemplarische Darstellung von verschiedenen Form-Auswertungen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 39: Beispielhafte Auswertung von entwurflichen Vorversuchen mithilfe von Netzdiagrammen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 40: Zehn prototypische Geometrievarianten mit der besten Performanz
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 41: Beispiele gängiger Rapportregeln/ Verlegemuster
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 42: Größen und Typen der jeweiligen Module
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 43: Exemplarische Anwendung von Rapportregeln und Modulen auf einer Fassade
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 44: Darstellung verschiedene Geometrien mit Solarzellen im Rapport
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 45: Bildreihe von 4 Bildern aus den Vorversuchen; Abhängigkeit der Verformung zu Randsteifigkeit, Anzahl und Orientierung der Knicklinien
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel

- Abb. 46: Die Zeichnung zeigt den prinzipiellen Aufbau des Versuchs. Neben den vier Acrylglaswandscheiben (teilweise mit Skala) gibt es vier in der Länge verschiebbare Punktaufleger. Auf diesen wird der Versuchskörper platziert.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 47: Die Abbildungen zeigen einen Versuchskörper im Versuchsaufbau, mit Belastung durch 300ml Wasser und in der Übersicht.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 48: Exemplarische Tiefzugform aus Aluminium für die Serienproduktion; Tiefgezogene Folie in Serienfertigung; Folie für das Tiefziehen auf Rolle zur Serienproduktion
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 49: Rohmaterial V4417 zum Formenbau; Rohmaterial in der Fräse beim Zerspannungsvorgang; Fertige Tiefzugform (links)
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 50 (links) Versuchskörper in der Biegezugmaschine mit angepasstem Druckstempel
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 51 (rechts) Die Grafik zeigt den Verlauf der auf den Versuchskörper einwirkenden Kräfte anhand des gefahrenen Wegs(X-Achse) und der aufgebrauchten Kraft(Y-Achse)
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 52: (links) Die ausgewählte prototypische, planare Form, (rechts) Form mit einfach gekrümmten Flächen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 53: Petersen C. (1982), Tabellen zur Bauteildimensionierung, Tafel 8.4 / 8.5 In: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, Braunschweig, Seite 794-795
- Abb. 54: Überprüfung der Spannungswerte mit Sicherheitsfaktor zur Ermittlung des Versagenfalls. Um lokale Spannungsspitzen auszuschließen wird die Eigenschwingung (Buckling Mode) des Bauteils auf Kongruenz mit der Globalverformung überprüft.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 55: Nachweis der Spannungsgrenze, um auszuschließen, dass das Material 'fließt'.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 56: Farbcodierung unterschiedlicher Anstellwinkel und Deckflächenhöhen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 57: Tabelle Materialkennwerte
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 58: Unterschiedlichen Bauteilhöhen in der Ansicht
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 59: Form 01 – 05. v.l.n.r. sind verschiedene Variationen im gleichen Parameterraum zu sehen. Ganz rechts ist die Form zu sehen, die als Demonstrator gefertigt wurde.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel

- Abb. 60: FEM-Simulation 01 – 05. v.l.n.r sind die äquivalenten FEM-Simulationsergebnisse zur obigen Formstudienreihe zu sehen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 61: Zu sehen ist die Flächenlast, die auf eine Beispielgeometrie wirkt
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 62: FEM-Simulation 01 – 05. v.l.n.r sind die äquivalenten FEM-Simulationsergebnisse zur obigen Formstudienreihe zu sehen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 63: Die Tabelle zeigt das Panel mit Krafteinwirkung, Flächenlast 800 N/mm^2 auf der Frontseite des Testkörpers (links) die nicht zum Kollabieren führt (mitte) und einmal mit der doppelten Last(rechts).
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 64: Die Abbildungen zeigen zwei Paneele. Einmal mit zwei (links) und einmal mit vier (rechts) Solarmodulen ausgestattet. Das Paneel ist nach Süden ausgerichtet, der errechnete Wert ist für den Standort Frankfurt/Main ermittelt worden.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 65: Demonstrator MS Wissenschaft. Links ist das Panel sowie zwei Materialproben zu sehen. Rechts die solare Simulation am Bildschirm sowie die Bedienelemente.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 66: Kippen der Deckfläche um die Längsachse(links), Querachse(mittig) und vergrößern bzw. verkleinern der Deckfläche(rechts)
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 67: Joystick (Neigung der Schnittebene), Drehregler links (Größe der Frontfläche), Drehregler rechts (Anzahl der solaren Flächen), Knopf = Start der solaren Simulation
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 68: Ausgangsposition in Mittelstellung(links), Variation mit kleiner(mittig) und großer Deckfläche(rechts)
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 69: Unterschiedliche Einstellungen der Achsen bei mittlerer Deckflächengröße
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 70: Mögliche Menge an solaraktiver Fläche
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 71: In einer Prototypischen Fassade werden die erzeugten Geometrien aggregiert
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 72: Annahme Paneeltragwerk
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 73: Kategorisierung der verschiedenen zusätzlichen Versteifungen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel

- Abb. 74: Kategorisierung der verschiedenen zusätzlichen Versteifungen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 75: Kategorisierung der verschiedenen zusätzlichen Versteifungen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 76: Detaillierte Modellierungsgrade der Geometrie mit differenzierten Kanten und Sicken
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 77: Verformung unter Last für Variante A und B (/w Fillet) in cm. 1.3.8. Ausblick: statische RFEM
Detailsimulation
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 78: Grundform des Rahmens an dem die Auflager platziert werden
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 79: v.l.n.r.: Rautenförmige und kreisförmige Bohrung, rechteckiger Ausschnitt
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 80: Exemplarischer Ausschnitt aus den Ergebnissen der Detailsimulationen. Gut erkennbar an den Farbunterschieden ist die große Bandbreite an Geometrien und Ergebnissen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 81: 3x2 Matrix, die in der 3er Reihe verschiedene Auflagermodellierungen (v.l.n.r. hexagonal, quadratisch, rechteckiger Ausschnitt) und in der 2er Paarung unterschiedliche Gesamthöhen (100mm und 150mm).
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 82: Obere Reihe mit Aussteifung im großen Feld, untere Reihe ohne. In der Gegenüberstellung zeigt sich die bessere Performance der ausgesteiften Formen
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 83: Links: Ausgangsgeometrie. Rechts: Optimierte Form.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 84: Von oben nach unten: Spannbacken, Polycarbonat-Paddel, TPU, OPV Modul, TPU, Polycarbonat-Paddel, Spannbacken. Mitte und rechts zeigt die beiden Ausrichtungen des OPV-Moduls mit dem Multimeter zur Spannungsmessung symbolisch zwischen beiden Versuchskörpern.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 85: Der Versuchskörper im Teststand. Unten rechts ist das Multimeter zu erkennen, das die Spannung des OPV-Moduls misst.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 86: Plots der Zugversuche
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 87: Die prototypische Form in der Spannungsanalyse. Die grobe Legende zeigt die Hauptunterschiede in den Spannungsverläufen.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel

-
- Abb. 88: Bei feinerer Auflösung ist zu erkennen, wie sich die Spannungen in den einzelnen Flächen verändern
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 89: Funktionsschema digitales Planungstool
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 90: Einstellungsschritte Geometrierstellung
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 91: Solare Simulationsbedingungen mit und ohne Kontexterstellung
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 92: Aufbau des Planungstools mit Loop zur Optimierung
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 93: Ergebnisse Einzelpaneeloptimierung
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 94: Solare Simulationskontextgenerierung Fassadenoptimierung
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 95: Ergebnisse Fassadenoptimierung
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 96: v.l.n.r.: Grundform aus V 4417, Form im CNC-Bearbeitungszentrum, fertige Tiefzugwerkzeuge.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 97: v.l.n.r.: Erhitzen der Polycarbonat-Folie, Überziehen der erhitzten Folie über die Form, Besäumen des abgekühlten Polycarbonats und entfernen des fertigen Teils.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 98: Auflegen der unteren Schale auf das Werkzeug, Reinigen der Schale, Anheften der Drahtverbindungen für die OPV-Module auf dem TPU.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 99: Das zu laminierende Teil im Vakuum Sack vor und nach absaugen der Luft sowie auf dem Teileträger.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 100: Der leere, geöffnete Autoklav, die Teile im Autoklav, ein fertiges Element.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 101: „Waffle-Structure“ in der Explosionszeichnung, der fertige Druckstempel an der Wegezugsmaschine und die Bewegungsrichtung der Maschine während des Versuchs.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 102: (links) Die Grafik zeigt den Verlauf der auf den Versuchskörper einwirkenden Kräfte anhand des gefahrenen Wegs(X-Achse) und der aufgebracht Kraft(Y-Achse); Versuchskörper in der Wegezugsmaschine, gut zu erkennen die Durchbiegung des Druckstempels aus MDF

- (rechts).
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 103: Einer der Autoren auf dem getesteten Panel nach absolvieren des Wegezugsversuchs. Die Gesamtbelastung beträgt etwa 75kg.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 104: Vorentwurf mit OPV-Zellen, die auf die Trägergeometrie abgestimmt sind.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 105: Entwurf der Schaufassade, mit planaren Fassadenelementen, thermo-geformten Trägerelementen mit einlamierten OPV-Zellen sowie aufgedruckten Mustern unterschiedlicher Dichtigkeit.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 106: Innenseiten der Schaufassade mit zwei verschiedenen Mustern in unterschiedlicher Blickdichtigkeit.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 107: Der linke Teil der Schaufassade, mit planaren Fassadenelementen, thermo-geformten Trägerelementen mit einlamierten OPV-Zellen sowie aufgedruckten Mustern unterschiedlicher Dichtigkeit.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 108: Drei der fünf Infotafeln der Schaufassade Sun Skins. Herstellungsprinzip (links), digitaler Designansatz (mittig) und Illustration der Elemente als Vorhangfassade.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 109: Gliederung des Projektvideos und Stils aus den fünf Kapiteln des Projektfilms, von links oben nach rechts unten.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 110: Schaufassade mit räumlichen Leichtbau-Trägerelementen und Solarzellen (links). Durchblick und Spiegelung im Detail.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 111: Aufbau der Sandwich-Konstruktion des entwickelten OPV-Trägersystems.
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 112: Globale Verformung planarer Polycarbonat-Scheiben unterschiedlicher Stärke im Vergleich zum dreidimensional ausgeformten Träger bei identischer Last
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 113: Emissionen an Treibhausgas (CO₂) in Kilogramm pro Modul für das Basismaterial des Trägersystems: Dreidimensional ausgeformtes 4 mm dickes Polycarbonat im Vergleich mit 11 mm dickem Polycarbonat und 6 mm dickem Glas, jeweils aus Neumaterial und aus Rezyklat hergestellt
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel
- Abb. 114: Schematische Darstellung des Aufbaus mit selektiv platzierter Deckfolie ohne TPU(links). Vergleich der Abwicklungen Träger/Deckfolie. Schraffiert dargestellt ist der

Überlappungsbereich(rechts).
Eigene Darstellung © Isik-Plastik

Abb. 115: Tiefzugwerkzeug, Tiefzugvorgang und tiefgezogene Folie auf dem Werkzeug.
Eigene Darstellung © Isik-Plastik

Abb. 116: Dimensionen und fertig ausgeschnittene, planare Folie (Links, Mitte). Planare und tiefgezogene Folie in der Gegenüberstellung(rechts)
Eigene Darstellung © Isik-Plastik Kassel

Abb. 117: Fertig verklebtes Element
Eigene Darstellung © Isik-Plastik

Abb. 118: Präsentation der Forschungsergebnisse auf dem IBA '27 Festival
Eigene Darstellung © FRA-UAS & Universität Kassel

4.3 Glossar

Autoklav:	Zumeist als Röhre ausgebildete Maschine, welche mit Hilfe eines Vakuums unter Wärmezufuhr zwei oder mehr Bauteile zusammenpresst oder verklebt.
BIPV:	Bauwerkintegrierte Photovoltaik oder Building-integrated Photovoltaics. siehe auch GiPV.
CAD:	Computer-Aided Design.
Composite/Komposit:	Verbund aus zwei oder mehr Werkstoffen, welche dadurch als einheitliches Material wirken und betrachtet werden.
FEM:	Finite-Element-Methode.
Folie:	Dünner Kunststoff, als Halbzeug zumeist in Platten –oder Rollenware. In diesem Text werden, in Anlehnung an den Metallbau Platten unter 5mm Stärke als Folien bezeichnet.
GiPV:	Gebäude-integrierte Photovoltaik. Auch BiPV.
Komposit/Composite:	Verbund aus zwei oder mehr Werkstoffen, welche dadurch als einheitliches Material wirken und betrachtet werden.
Planar:	Alle Punkte einer Fläche in einer Ebene liegend.
Plug-in:	Zusatzprogramm, das ein bestehendes Software-Programm um eine oder mehrere Funktionen erweitert. Im Falle von Karamba3D© handelt es sich um ein Modul, welches der 3D-Modelliersoftware Rhinoceros3D© Funktionen zur Simulation eines FEM-Modells zur Verfügung stellt.
OPV:	Organic Photovoltaic, organische Photovoltaik beschreibt Photovoltaik-Zellen, die auf kohlestoffartigen Verbindungen basieren.
Tesseliert:	Aufteilen von Flächen in kleinere Teile. In diesem Kontext relevant, dass eine eigentlich runde Fläche in mehrere ebene Flächen aufgeteilt wird. Je höher die Anzahl der Teilungen bzw. je feiner der Tesselierungsgrad, desto mehr nähert sich das tesselierte Ergebnis dem Ausgangsfläche an.
Thermoformen:	Thermoformen bezeichnet das umformen thermoplastischer Materialien mittels Zufuhr von Wärme.
Thermoplastisch:	Materialien, die unter Wärme ihren Zustand verändern, sind thermoplastisch.