



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 17. November 2020

P+D-Projekt: BIPV-Fassaden Benchmark



MFH Seewadelstrasse in Affoltern am Albis - Quelle: © Viridén + Partner AG / Ernst Schweizer



University of Applied Sciences and Arts
of Southern Switzerland

SUPSI

Datum: 17. November 2020

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Viridén + Partner AG
Zweierstrasse 35, CH-8004 Zürich
www.viriden-partner.ch

Ernst Schweizer AG
Bahnhofplatz 11, CH-8908 Hedingen
www.ernstschweizer.ch

SUPSI - Dipartimento ambiente costruzioni e design (DACD)
Via Trevano, 6952 Canobbio
www.supsi.ch

Autor/in:

Büsser Andreas, Viridén + Partner AG, buesser@viriden-partner.ch
Bonomo Pierluigi, SUPSI, pierluigi.bonomo@supsi.ch
Corti Paolo, SUPSI, paolo.corti@supsi.ch Frontini Francesco, SUPSI, francesco.frontini@supsi.ch
Haller Andreas, Ernst Schweizer AG, andreas.haller@ernstschweizer.ch
Viridén Karl, Viridén + Partner AG, viriden@viriden-partner.ch

BFE-Projektbegleitung:

Bundesamt für Energie, Sektion Cleantech, Herr Men Wirtz, men.wirz@bfe.admin.ch
Stefan Oberholzer, Forschungsbereich PV, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501753-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Ziel dieser Studie ist es, eine Methode für den Kostenvergleich von gebäudeintegrierten PV-Fassaden (BIPV-Fassaden) zu entwickeln, und auf dieser Basis die Kosten der BIPV-Fassaden von sechs realisierten Projekten auszuwerten. Die genauen Daten, die projektbasierte Analyse der Konstruktionsdetails mit Einbezug von Endnutzern, Forschern, Planern und der Industrie ermöglichten es, genaue Datensätze und Ergebnisse zu erarbeiten.

Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Ermittlung einiger Strategien zur Kostenreduzierung in Bezug auf Produkte und Prozesse entlang der Wertschöpfungskette. Darüber hinaus ist dieses Verfahren auf der Ebene verschiedener technologischer Systeme (z.B. Dach, Vorhangfassade usw.) skalierbar, da es auf einem Konstruktionsansatz basiert. Die Ergebnisse verdeutlichen einige wirtschaftliche Trends im Laufe der Jahre, die technologischen und marktbedingten Einflussfaktoren auf die Kostenveränderung und die Strategien für eine Kostenoptimierung für BIPV-Fassaden.

Der konkrete Aufwand bei den untersuchten Fallstudien beträgt im Durchschnitt 11% für die Planungstätigkeit, 26% für die Fassadenbekleidung, 14% für die Unterkonstruktion und 15% für die Tragstruktur. Diese vier Aspekte sind zusammen für 66% der Gesamtkosten der BIPV-Fassaden verantwortlich.

Die Analyse der Fallbeispiele zeigte eine Kostensenkung des identischen, kundenspezifischen PV-Moduls von etwa 20% innerhalb der drei letzten Jahre. Diese Kostensenkung wurde durch die entstehende Konkurrenzsituation unter den Modulanbietern und Optimierung der Prozessabläufe erreicht.

Aufgrund der Erfahrung mit einem im Rahmen dieses Projektes erstellten Prototyps können folgende Punkte für eine weitere Kostenoptimierung bei einer hohen Vorfabrikation angeführt werden:

- Der Montageaufwand der Unterkonstruktion ist in der Werkstatt zeitlich wesentlich effizienter als auf der Baustelle, Voraussetzung ist eine gute Arbeitsvorbereitung. Konkret bedeutet dies u.a.: Präzis vermasste und mit allen notwendig Angaben erstellte Plangrundlagen, spezifisch für jedes Wandelement mit Prüfung und Freigabe von allen von allen involvierten Akteuren.
- Die erhöhte Massgenauigkeit innerhalb des (vorfabrizierten) Rohbaus hat für alle nachfolgenden Arbeitsgattungen einen positiven Effekt, welcher sich in terminlicher und finanzieller Hinsicht positiv auswirkt.
- Holzbaufirmen haben die Affinität, ein solches Thema schwerpunktmässig aufzunehmen und umzusetzen. Es ist eine Branche, welche sich seit Jahren mit dem Thema Vorfabrikation und Kostenoptimierung auseinandersetzt und es versteht, Leistungen von anderen Arbeitsgattungen zu integrieren und als Gesamtprodukt auf dem Markt anzubieten.

Einen entscheidenden Einfluss für eine kostengünstige Umsetzung einer BIPV-Fassade liegt bei der Architektur des Gebäudes. Positiv beeinflusst werden die Kosten durch folgende Merkmale:

- Gebäude mit einem einfachen Volumenkörper und einfacher Abwicklung der Aussenhüllfläche
- Fensterflächen auf wenige Element reduziert oder einheitliche, regelmässigen Fensterrasterung
- Keine oder volumetrisch klare Vor- und Anbauten, wie Erker, Balkone, Vordächer usw.
- Klare und regelmässige Rasterung in der Gebäudehülle
- Einheitliche Geschosshöhe, einheitliche Brüstungsbänder
- Einheitliche Aussenwandkonstruktion mit einfachen Befestigungsmöglichkeiten der Unterkonstruktion



Résumé

L'objectif de cette étude est de développer une méthode de comparaison des coûts de façades PV intégrées au bâtiment (façades BIPV) et, sur cette base, d'évaluer les coûts des façades BIPV de six projets achevés. Des données précises, l'analyse par projet des détails de construction, la participation des utilisateurs finaux, de chercheurs, de planificateurs et de l'industrie ont permis d'obtenir des ensembles de données et des résultats précis.

Les résultats constituent la base de détermination de certaines stratégies de réduction des coûts liées aux produits et aux processus le long de la chaîne de valeur. De plus, ce processus est extensible au niveau de différents systèmes technologiques (ex: toiture, mur-rideau, etc.), puisqu'il repose sur une approche constructive. Les résultats illustrent certaines tendances économiques au cours des années, les principaux facteurs qui ont influencé l'évolution des coûts, à la fois au niveau technologique et du marché, et les stratégies d'optimisation des coûts des façades BIPV.

L'analyse des études de cas examinés offre quelques résultats concrets. Les dépenses s'élèvent, en moyenne, à 11%, du coût total de l'enveloppe du bâtiment, pour les travaux de planification, 26% pour le revêtement de façade, 14% pour la sous-structure et 15% pour la structure portante. Ensemble, ces quatre aspects représentent environ 66% du coût total des façades BIPV.

L'analyse des études de cas a montré une réduction des coûts des modules PV identiques et spécifiques au client d'environ 20% au cours des trois dernières années. Cette réduction des coûts a été obtenue grâce à la concurrence entre les fournisseurs de modules et à l'optimisation des processus.

Sur la base de l'expérience acquise lors du développement d'un prototype créé dans le cadre de ce projet, les points suivants peuvent être cités pour une optimisation supplémentaire des coûts de pré-fabrication haute qualité:

- Le temps de montage de la sous-structure est beaucoup plus rapide en atelier que sur le chantier; une bonne préparation des travaux est une condition préalable. Concrètement, cela signifie, entre autres: des bases de planification mesurées avec précision à l'avance avec toutes les informations nécessaires, spécifiquement pour chaque élément de mur avec test, et approuvées par toutes les parties prenantes.
- La précision accrue des mesures prises affecte l'ensemble du processus et travaux ultérieurs en termes de gains temporels et monétaires.
- Les entreprises de construction en bois ont une affinité pour se concentrer sur un tel projet et le mettre en œuvre. C'est une industrie qui traite depuis des années le sujet de la préfabrication et de l'optimisation des coûts, et qui sait intégrer les services d'autres types de travaux et les proposer sur le marché comme un produit complet.

L'architecture du bâtiment a une influence décisive sur la mise en œuvre rentable d'une façade BIPV. Les coûts sont influencés positivement par les caractéristiques suivantes:

- Construire avec une géométrie sobre et un développement simple de l'enveloppe extérieure
- Zones de fenêtre réduites à quelques éléments, et/ou une grille de fenêtre uniforme et régulière
- Limiter ou maintenir une volumétrie claire des surfaces encastrées ou saillantes, tels que baies vitrées, balcons, auvents et autres.
- Grille claire et régulière dans l'enveloppe du bâtiment
- Hauteur d'étage uniforme, bandes de parapet uniformes
- Construction uniforme et homogène de la paroi extérieure du bâtiment, avec des options de fixation simples pour la sous-structure



Summary

The aim of this study is to develop a method for the cost comparison of BIPV facades that permits to clearly identify the details of the end user costs of photovoltaic facades. The method has been validated by analysing the BIPV facades of six Swiss case studies, experimented as pilot buildings in the recent years. The accuracy of the data, the project-based analysis of the construction details, the involvement of end users, researchers, planners and industry permitted to get accurate datasets and results.

The results lay the foundation for identifying some cost reduction strategies regarding products and processes along the value chain. Moreover, this method is scalable on the level of different technological systems (e.g. roof, curtain wall, etc.) since it's based on a construction approach. Results highlight some economic trends over the years, the key drivers that influenced the cost change, both on a technological and market level, and strategies for optimizing costs for BIPV facades.

The analysis of the case studies examined offer some results. The planning expenditures cover, in average, about the 11% of the building envelope total cost, 26% for the cladding, 14% for substructures, 15% for the load-bearing structure. These four aspects together account for about the 66% of the total cost of the BIPV facades.

The analysis of the case studies showed a cost reduction of the identical and customer-specific PV modules of around 20% during the last three years. This cost reduction was achieved through the competition between the module providers and the optimization of the processes.

On the base of the experience gained during the development of a prototype developed within the scope of this project, the following strategies emerged to optimize the cost of a high quality prefabricated facade:

- The assembly of the substructure is much more time-efficient in the workshop than on the construction site. An accurate planning is a prerequisite. This means that the measures and the information regarding each facade element should be accurate and taken in advance and approved by all stakeholders.
- The accuracy of the measures taken affects the whole process in terms of time and money savings.
- The timber construction companies have a large experience in prefabrication and the necessary means to implement it and to optimize the cost of manufacturing by offering to the market a complete product.

The architecture of the building has a decisive influence on the cost-effective implementation of a BIPV facade. The costs are positively influenced by the following features:

- Building envelope with simple geometries.
- Windows reduced to few elements or uniform, regular window grid.
- Limitation of recess or protruding surfaces such as balconies, canopies, etc.
- Clear and regular grid of the building envelope.
- Uniform story height and uniform parapet strips
- Homogeneous construction of the building envelope with simple fastening for the substructure.



Take-home messages

- Die erarbeitete Kostensystematik ist replizierbar und skalierbar für jede Art von Gebäude mit BIPV-Fassaden
- Die Analyse jedes einzelnen Kostenelements der BIPV-Fassade dient als Grundlage für die Optimierung einer Kostensenkung
- Für einen höheren Vorfertigungsgrad bei BIPV-Fassaden sind seitens Planenden, Lieferant des Unterkonstruktionssystems und den Ausführenden weiterführende Innovationen für einen funktionierenden Prozessablauf notwendig.
- Mit einer Standardisierung der BIPV Produkten werden sich vermehrt Investoren und Bauherren mit Ihren Beratern/Architekten/Fachplanern an die Umsetzung heranwagen.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé	4
Summary	5
Take-home messages	5
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	10
1.2 Motivation des Projektes.....	11
1.3 Projektziele	11
2 Teilprojekt Kostenvergleich BIPV-Fassaden	12
2.1 Erreichte Ergebnisse.....	12
2.2 Methodik	12
2.3 BIPV-Fallstudien	15
2.4 Analyseergebnisse.....	15
2.4.1 Gesamtsicht	16
2.4.2 Fassaden-Bekleidung	18
2.4.3 Elektroinstallationen.....	20
3 Teilprojekt Prototyp für hohen Vorfertigungsgrad.....	21
3.1 Erreichte Ergebnisse, Erkenntnisse	21
3.2 Objektbeschreibung	21
3.3 Schlüsselstellen	22
3.4 Planung und Bauablauf.....	22
3.5 Bedürfnisse und Anforderungen für hohen Vorfabrikationsgrad.....	23
3.6 Evaluation und Wahl der Unterkonstruktion.....	24
3.7 Zusammenarbeit und Schnittstellen.....	25
3.8 Ausführungsplanung	26
3.9 Bau Prototyp Südwestfassade in der Werkstatt.....	27
3.10 Montage Fassadenelemente und Resultate der Vermessung am Bau	30
3.11 Bekleidungselemente Fassade / Glas/Glas-Photovoltaikmodul	32
3.12 Kostenoptimierung durch die erhöhte Vorfabrikation.....	35
4 Teilprojekt Ausblick für zukünftige mögliche Kostensenkungen.....	36
4.1 Architektur des Gebäudes	36
4.2 Planungsaufwand (A).....	37
4.3 Bekleidung (B) - Photovoltaik-Module.....	38



4.3.1	These zur Marktentwicklung der PV-Module für BIPV-Systeme.....	39
4.4	Aufhängesystem (C) / Unterkonstruktion (D)	40
4.5	Elektrische Installation (H)	41
5	Schlussfolgerungen und Fazit	42
6	Ausblick und zukünftige Umsetzung.....	42
7	Nationale und internationale Zusammenarbeit	42
8	Publikationen	43
9	Literaturverzeichnis	43
10	Referenzen	43
11	Anhang	44



Abkürzungsverzeichnis

BIPV: Building integrated Photovoltaic (Gebäude integrierte Photovoltaik)

BIM: Building Information Modeling

SSG: Structural Sealant Glazing

PV: Photovoltaik

VHF: vorgehängte hinterlüfteten Fassadenkonstruktion



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Die gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen (BIPV) bieten ein grosses Potenzial zur Nutzung verfügbarer Oberflächen in der gebauten Umwelt für eine dezentrale Erzeugung erneuerbarer Energie. Zudem sind sie eine wichtige Chance für eine Marktentwicklung und den Aufbau einer wettbewerbsfähigen, solaren Wertschöpfungskette. Der Fortschritt der Solarindustrie stellte eine breite Palette multifunktionaler Produkte für die Gebäudefassaden zur Verfügung. Der BIPV-Markt erreichte jedoch nicht die prognostizierten Ergebnisse und besetzt weiterhin eine Nische.

Rund 1% des globalen PV-Marktes betrafen 2017 BIPV-Anlagen. In Europa betrug der Anteil der BIPV-Anlagen am jährlichen Bauprodukt höchstens 2% der Gesamtfläche der 2017 renovierten oder neu errichteten Dächer und Fassaden. Schätzungen zufolge wird BIPV bis 2022 rund 13% des PV-Marktes ausmachen. In der Schweiz beträgt ein positives Szenario der BIPV-Kapazität für Wohn- und Nichtwohngebäude 12 bzw. 6 GWp. Das niedrige Szenario beträgt 4 bzw. 2 GWp für Wohn- und Nichtwohngebäude [1] (siehe Kapitel 10 «Referenz»).

In der Schweiz sind in den letzten Jahren diverse gebäudeintegrierte PV-Fassaden-Projekte mit unterschiedlichen Typologien realisiert worden.

Die Realisierung von BIPV-Fassaden haben hohe Anforderungen an die Planenden und Ausführenden. Es sind viele Fachleute bei der Planung und der Umsetzung einer PV-Fassade beteiligt. In einem solchen multidisziplinären Bereich und der Komplexität der Prozessrisiken müssen mehrere Interessengruppen koordiniert und geklärt werden, um die endgültigen Baukosten, die sich auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirken, weiter zu senken. Der Nischenmarkt von BIPV, der immer noch häufig mit dem traditionellen PV-Ansatz verbunden ist, hält viele Bauinvestoren und Planer von der Realisierung einer Solar-(BIPV)-Fassade ab. Infolgedessen enthalten die Angebote häufig einen «Angstzuschlag» für die Kosten. Das führt häufig dazu, dass BIPV-Fassade nicht realisiert wird.

Bis heute fehlen für Planende, Fachleute und Ausführende Grundlagen für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer BIPV-Fassade. Es sind nur wenige Erfahrungswerte verfügbar. Eine mögliche Methode der Wirtschaftlichkeitsberechnung basiert auf der Logik, dass die tatsächliche Investition von BIPV nur anhand der zusätzlichen Kosten bewertet werden sollte, sprich die BIPV-Fassade im Vergleich zu einer konkurrierenden herkömmlichen Gebäudehüllenslösung. Die folgende Grafik zeigt die zusätzlichen Kosten einer repräsentativen BIPV-Fassade.

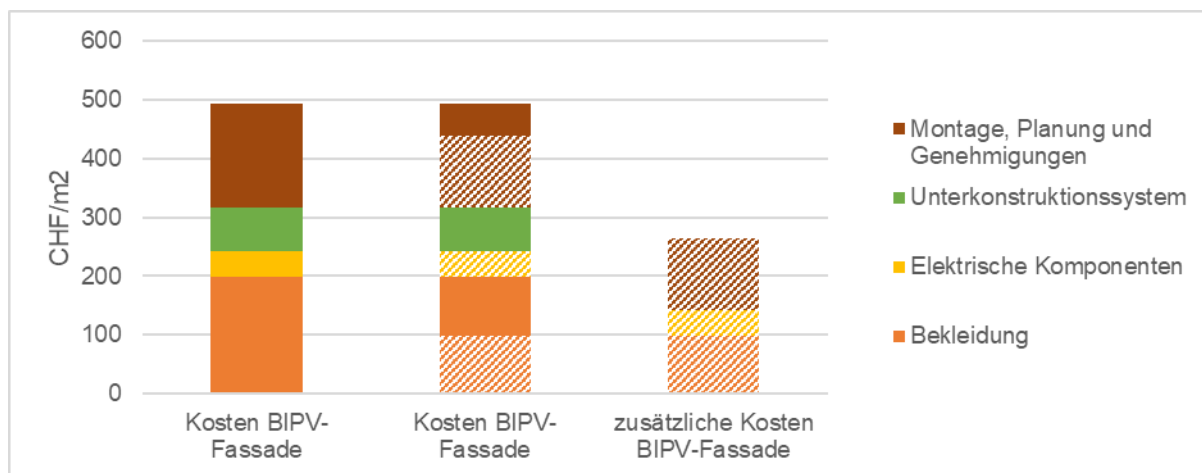


Abb. 1 Schätzung der zusätzlichen Kosten aufgrund von BIPV-Fassade; die gepunktete Linie stellt die zusätzlichen Kosten dar, die für eine BIPV-Fassade dazu zurechnen sind.



Die zusätzlichen Kosten werden nur durch die Elemente oder Teile von Elementen dargestellt, die nicht durch konkurrierende und herkömmliche Lösungen für die Gebäudehülle ersetzt werden. Somit werden die zusätzlichen Kosten für eine BIPV-Fassade durch den Mehrpreis der Bekleidung der PV-Module, BoS (Balance of System, sprich elektrische und strukturelle Komponenten) und dem Mehraufwand der Montage der PV-Module definiert.

Auf der Grundlage dieser Logik legt diese Methode auch die Grundlage für die Bewertung der tatsächlichen wirtschaftlichen Investition der Gebäudehülle, die zur Implementierung der Analyse der Kostenwettbewerbsfähigkeit von BIPV-Systemen erforderlich ist. Weitere Informationen zur Berechnung der Kostenwettbewerbsfähigkeit von BIPV-Fassaden auf der Grundlage der in dieser Studie entwickelten Methode, wird im BIPV-Statusbericht 2020, der von SUPSI und dem Becquerel-Institut entwickelt wurde, erläutert.

1.2 Motivation des Projektes

Der Sinn und Zweck des Projekts bestehen darin, die wichtigen Kostenfaktoren eines BIPV-Gebäudes zu ermitteln und transparent aufzuzeigen. Zusammen mit einem Werkstattbericht über die Umsetzung einer vorfabrizierten BIPV-Fassade bei einem Ersatzneubaus und einem Ausblick für das Potential für zukünftige Kostenreduktion erhalten die Planenden, Fachleuten und Ausführenden eine Vorstellung der Kostenstruktur von BIPV-Fassaden. Sie können diese Erkenntnisse auf ihre eigenen Projekte übertragen.

1.3 Projektziele

Das P+D-Projekt BIPV-Fassade Benchmarks ist in drei Teilprojekte gegliedert. Dazu wurden folgende Ziele gesetzt:

Teilprojekt Kostenvergleich BIPV-Fassaden

Diese Teilprojekt hat zum Ziel, eine Methode zu erarbeiten, mit welcher die Kosten einer BIPV-Fassade detailliert analysiert werden können. Daraus lässt sich allenfalls eine Lernkurve oder ein Kostentrend ermitteln.

Die erarbeitete Methode wird an Hand von einigen BIPV-Fallstudien überprüft. Bei den Fallstudien handelt es sich um Gebäude, welche von Viridén + Partner AG, Ernst Schweizer AG und SUPSI realisiert oder begleitet wurden.

Teilprojekt Prototyp für hohen Vorfertigungsgrad

Beim Ersatzneubau Mehrfamilienhaus Seewadelstrasse in Affoltern am Albis soll auf einer Fassaden-seite eine Steigerung der Vorfertigung der Fassadenhaut in der Werkstatt angestrebt werden, d.h. inklusive Montage der Fenster, Fensterzargen sowie die Unterkonstruktion für die Glasfassadenmodule usw. Die Erfahrungen und Herausforderungen beim Bau eines Prototyps über eine definierte Fassadenfläche werden dabei festgehalten und dokumentiert.

Teilprojekt Ausblick für zukünftige mögliche Kostensenkungen

Das Projektteam wird anhand der Auswertungen der Kostenvergleiche und aus den Erfahrungen des Prototyps mit hoher Vorfertigung einen Ausblick für zukünftige mögliche Kostenreduktionen aufzeigen.



2 Teilprojekt Kostenvergleich BIPV-Fassaden

2.1 Erreichte Ergebnisse

Die erarbeitete Methode zum Kostenvergleich wurde an der BIPV-Fassade von sechs in der Schweiz ausgeführten Projekten (siehe Kapitel 2.3) validiert. Sie ermöglicht die Untersuchung der wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Bauteilen, als auch zwischen aktiven und nicht aktiven Fassadenbekleidungen. Die Genauigkeit der Kostendaten ist der Mehrwert dieser Methode. Dank der detaillierten Aufschlüsselung der Gewerke konnten die verschiedenen Akteure unter Berücksichtigung der einzelnen Bauphasen die tatsächlichen Kosten für die analysierten Fallstudien darstellen.

Diese Analyse legt den Grundstein für eine wirtschaftliche Optimierung entlang des Bauprozesses. Darüber hinaus ist diese Methode auf andere Systeme (wie dachintegrierten Photovoltaikanlagen) anwendbar. Jedes analysierte Element wird als Teil des Bauprozesses, aber auch als einzelne Komponente betrachtet.

Der Vergleich der Kostenaufteilung für die BIPV-Fassaden der verschiedenen Fallstudien ermöglicht es, einen wirtschaftlichen Trend über die Jahre zu identifizieren. Dazu werden die wichtigsten Kostentreiber sowohl auf technologischer als auch auf Marktebene identifiziert. Daraus können Strategien für eine Kostenoptimierung des gesamten BIPV-Prozesses abgeleitet werden (Erarbeitung im Teilprojekt „Ausblick für zukünftige mögliche Einsparungen“).

Erste Erkenntnisse aus den ausgewerteten Fallstudien

Anhand von Gesamtkosten ist es schwierig, mit den sechs ausgewerteten Fallstudien eine Lernkurve zu skizzieren. Dazu ist die Anzahl der ausgewählten Fallstudien als auch der Markt noch zu klein. Zudem besteht der Bauprozess einer aktiven Bekleidung aus einer grossen Anzahl an klassischen Arbeitsgattungen und Aktivitäten, die etabliert sind. Um eine Lernkurve für die PV-Fassade zu ermitteln, müssen viele weitere Projekte ausgewertet werden.

Eine spezielle Herausforderung sind die gültigen Vorschriften, Normen und (Sicherheits-) Regeln für Gebäudefassaden.

Kostentreibend bei allen Pionierprojekten ist ebenso der jeweils notwendige «Entwicklungsaufwand». Namentlich zu erwähnen ist der noch nicht etablierte Planungsprozess und der damit verbundene Mehraufwand für die Planungstätigkeit und Kommunikationsaufwand zwischen Planenden und Ausführenden.

Der konkrete Aufwand bei den untersuchten Fallstudien beträgt im Durchschnitt 11% für die Planungstätigkeit, 26% für die Fassadenbekleidung, 14% für die Unterkonstruktion und 15% für die Tragstruktur. Diese vier Aspekte sind zusammen für 66% der Gesamtkosten der BIPV-Fassaden verantwortlich.

Die Analyse der Fallbeispiele zeigte eine Kostensenkung des identischen, kundenspezifischen PV-Moduls von etwa 20% innert rund 3 Jahre. Diese Kostensenkung in den letzten Jahren wurde durch die entstehende Konkurrenzsituation unter den Modulanbietern und Optimierung der Prozessabläufe erreicht.

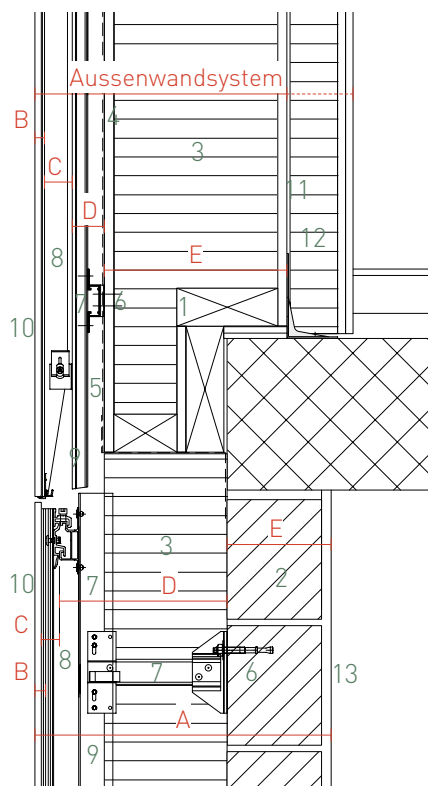
2.2 Methodik

Die Methode basiert auf der systematischen Aufschlüsselung der Kosten für die Erstellung der Gebäudehülle entlang des Bauprozesses. Der BIPV-Bauprozess von sechs BIPV-Fallstudien wurde nach einem Top-Down-Ansatz in verschiedene Ebenen unterteilt. Basierend auf den Erfahrungen von Architekten und Experten wurden die wichtigsten Phasen identifiziert:

- BIPV-Erstellungsprozess 1-3 (siehe Abbildung 3): Er ist unterteilt in Planung, Herstellung/ Konstruktion und in Betrieb/ Wartung.



- Hauptkostengruppe (A-L): Damit wird die BIPV-Fassade funktional unterteilt und kann für jeden Teil des BIPV-Erstellungsprozesses einzeln betrachtet werden. Die Gruppen B-E sind in der Abb. 2 dargestellt. Darin werden zwei Typologien von Gebäudehüllen (oben: Leichtbau, unten: Massivbau) beispielhaft dargestellt.
- Unterkostengruppe (AA, AB... HF): Damit wird bei Bedarf jedes Elements charakterisiert und unterschieden (z.B. BA «Bekleidung aktiv» oder BB «Bekleidung nicht aktiv»).
- Spezifikationsgruppe (BA1, BA2... LA3): Sie repräsentiert eine Unterteilung der Unterkostengruppe nach Material, Logistik und Zusammenbau. Bei Bedarf könnte jede Spezifikationsgruppe weiter in detailliertere Punkte unterteilt werden (z.B. mit kristallinen Zellen aktive Bekleidung gegenüber mit Dünnschichtzellen aktive Bekleidung usw.).



Hauptkostengruppen

B Bekleidung (BA aktiv /BB nicht aktiv)
C Aufhängesystem
D Unterkonstruktionssystem
E Tragsystem

Elemente

1 Tragsystem (Leichtbaukonstruktion in Holz)
2 Tragsystem (z.B. in Backstein)
3 Wärmedämmung
4 äussere Beplankung
5 Winddichtigkeitsschicht
6 Befestigung
7 Unterkonstruktion
8 Backrail
9 Luftschicht
10 Photovoltaikmodule
11 Dampfsperre
12 Innenverkleidung
13 Innenputz

Abb. 2: Schnitt einer BIPV-Fassade mit der Tragstruktur: Leichtbau oben, Massivbau unten

Für die einzelnen Fallstudien wurden folgende Kennzahlen ermittelt:

- Baujahr der BIPV-Fassade: Die Referenzlernkurve und die Analyse der BIPV-Fassade basieren auf der chronologischen Klassifizierung der Gebäude.
- Eigenverbrauchsrate: Energie, die mit der BIPV-Fassade erzeugt und vollständig genutzt wird.
- Selbstversorgungsrate: Prozentsatz des Energiebedarfs, der durch die mit der BIPV-Fassade erzeugte und vollständig genutzte Energie gedeckt wird.
- Aktive Bekleidungsfläche: Photovoltaikmodule, die Energie erzeugen.
- Nicht aktive Bekleidungsfläche: Photovoltaikmodule elektrisch nicht angeschlossen, Module ohne Zellen oder andere Flächen mit dem gleichen konstruktiven System der aktiven Mantelfläche.



- Konstruktives System: Es ist in massive, leichte oder gemischte Konstruktionen unterteilt.
- Fensterfläche im Bereich der aktiven und nicht aktiven Bekleidungsfläche: Verhältnis der Fensterfläche zu der gesamten aktiven und nicht aktiven Bekleidungsfläche.

Für jede Haupt- und Unterkostengruppe und wurden spezifische Kosten pro Referenzfläche (CHF/m²) identifiziert, sowie die Gesamtkosten (CHF).

Für die Hauptkostengruppe A-B-C-D-E-F-G-I-J wird die betrachtete Referenzfläche als die Summe aus aktiver und nicht aktiver Bekleidungsfläche summiert. Bei den Hauptkostengruppen H-K-L ist die betrachtete Referenzfläche nur die aktive Bekleidung (BA). Einige Haupt- oder Spezifikationsgruppen beziehen sich auf die nicht aktive Bekleidungsfläche (wie z.B. Bekleidung nicht aktiv) oder auf die aktive Bekleidungsfläche (wie z. B. Bekleidung aktiv, Gleichstromseite des Elektroplaners, Wartungsplanung).

Die mehrstufige Aufschlüsselung dieser Methode (Abb. 2) ermöglicht es, Projekte mit einer weniger detaillierten Kostengenauigkeit zu untersuchen und zu vergleichen.

BIPV Bauprozess	Hauptkostengruppe	Unterkostengruppe	Spezifikation
1 Planung	A Planungsaufwand	AA Architektur	
		AB Fassadenplaner	
		AC Arbeitsvorbereitung (AVOR) - Fassadenbauer	
		AD Tragwerksplaner	
		AE Elektroplaner DC-Seitig	
		AF Baustellenplanung	
		AG Sicherheitsplanung	
		AH Qualitätssicherung	
		AI Wartungsplanung	
2 Herstellung / Konstruktion	B Bekleidung	BA Bekleidung aktiv	BA1 Material*
			BA2 Logistik*
			BA3 Montage*
		BB Bekleidung nicht aktiv	
	C Aufhängesystem		
	D Unterkonstruktionssystem	DA Unterkonstruktion mit Dämmung, Aluminium	
		DB Unterkonstruktion ohne Dämmung, Aluminium	
		DC Unterkonstruktion mit Dämmung, wärmebrückenfrei	
	E Tragsystem	EA Tragsystem ohne Wärmedämmschicht	
		EB Tragsystem mit Wärmedämmschicht	
		EC Tragsystem Brüstung	
	F Zargenelement		
	G Abschlussteile		
	H Elektrische Installation	HA Wechselrichter	
		HB Leistungselektronik (Optimierer, etc.)	
		HC Verkabelung AC-Seitig	
		HD Verkabelung DC-Seitig	
		HE Batterie	
		HF Überwachungssystem	
	I Baustelleninstallation		
	J Andere		
	K Überwachung		
3 Betrieb / Wartung	L Wartung		

Abb. 3: Kostenschema für die Fallstudien

* Diese Unterteilung ist für jede Unterkostengruppe (oder Hauptkostengruppe, wenn keine Unterkostengruppe fehlt) des BIPV-Bauprozesses gegeben.



2.3 BIPV-Fallstudien

In einem ersten Schritt wurde ein Inventar von aktuellen und zu diesem Zeitpunkt bekannten BIPV-Projekten in der Schweiz zusammengestellt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Siehe dazu Abb. 7. Anschliessend wurden sechs BIPV-Fallstudien identifiziert, die aus Sicht der Autoren Beispiele für BIPV-Best Practices darstellen und die entsprechenden Kostendaten vorliegen. Diese Gebäude wurden in Zusammenarbeit mit SUPSI analysiert. Die folgenden Projekte aus Abb. 7 wurden bewertet: 01, 03, 04, 10, 11 und 13. Andere Projekte könnten nach der gleichen Methode geprüft werden.



Abb. 4: Alleestrasse, Viridén + Partner



Abb. 5: Hofwiesen/Rothstr., Viridén + Partner



Abb. 6: DeltaROSSO, DeltaZERO

Nachfolgenden ist eine Auswahl von diversen BIPV-Best Practices in der Schweiz aufgeführt. Die Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Nr.	Objekt	Erstellungsjahr	Nr.	Objekt	Erstellungsjahr
01	MFH Alleestrasse 44, Romanshorn	2012 Abb. 4	08	MFH Zwirnerstrasse, Zürich	2017
02	Palazzo Positivo, Chiasso	2013	09	Grosspeter Tower, Basel	2017
03	Verwaltungsgebäude Flumroc, Flums	2014	10	DeltaROSSO, Vacallo	2017 Abb. 6
04	MFH Hofwiesen/ Rothstrasse, Zürich	2016 Abb. 5	11	SonnenparkPLUS in Wetzikon	2018
05	MFH in Aesch	2016	12	MFH in Höngg, Zürich	2018
06	MFH Brütten	2016	13	MFH Seewadelstrasse, Affoltern a.A.	2018/19
07	MFH Solaris, Zürich	2017			

Abb. 7: Auswahl von diversen BIPV-Best Practices in der Schweiz (grau hinterlegt: ausgewählte Projekte für die Fallstudie)

Zu jeder ausgewerteten Fallstudie sind technische Datenblätter im Anhang A beigefügt. Dazu gehören: Kurzbeschreibung des Gebäudes, Gebäudedaten, BIPV-Spezifikationen und Fotos.

2.4 Analyseergebnisse

Dieses Kapitel zeigt eine Bewertung der in der Kostenanalyse als massgeblich identifizierten Punkte und ermöglicht es, einige Strategien zur BIPV-Prozessoptimierung zu skizzieren, welche im Rahmen des 3. Teilprojekts „Ausblick für zukünftige mögliche Kostensenkungen“ entwickelt werden.

Die Analyseergebnisse sind in drei Abschnitte unterteilt, in denen verschiedene Kostengruppen analysiert und die verschiedenen BIPV-Fallstudien, -Technologien und -Arbeitsansätze miteinander verglichen werden. Dies sind: Gesamtsicht, Fassaden-Bekleidung und Elektroinstallation.



2.4.1 Gesamtsicht

Die Abb. 8 und die Abb. 9 zeigen die durchschnittliche Kostenaufteilung des BIPV-Prozesses der analysierten Fallstudien für die Investoren, die Planenden und die Ausführenden. Dabei wurden Material-, Logistik- und Montagekosten berücksichtigt. Die Genauigkeit der Daten ermöglicht einen detaillierten Überblick über die Kostenparameter und legt den Grundstein für eine Kostenoptimierung des gesamten Prozesses. Die Photovoltaik-Bekleidung (B) nimmt etwa 26% der gesamten Kosten ein und beläuft sich auf etwa 400 CHF/m². Es stellt den Parameter dar, der die Kosten des Systems am stärksten beeinflusst.

Dieser Wert ändert sich auf der je nach PV-Technologie, des Entwicklungsstands der Technologie und einiger anderer Parameter, die in den folgenden Abschnitten analysiert werden.

Das Tragsystem (E) (15%) und Unterkonstruktionssysteme (D) (14%) machen zusammen etwa 29% der Investitionskosten aus. Die Kosten für Tragsysteme (EB) sind bei den Leichtbaulösungen höher, da die Kosten für die Wärmedämmung (wie bei Seewadelstrasse, SonnenparkPLUS und teilweise für die Hofwiesenstrasse) in den etwa 320-390 CHF/m² enthalten sind. Hingegen sind bei den massiven Tragsysteme (EA) die Investitionen für das Unterkonstruktionssystems höher, weil die Kosten für die Wärmedämmung (Alleestrasse, Flumroc, DeltaROSSO und teilweise Hofwiesenstrasse) in diesem Teil enthalten sind, ca. 150-380 CHF/m².

Der Planungsaufwand (A) für eine BIPV-Fassade beträgt rund 11% der Gesamtkosten. Bei komplexeren Fassaden wie Alleestrasse, Seewadelstrasse und SonnenparkPLUS sind die Kosten etwas mehr als 200 CHF/m². Bei der ebenfalls aufwendigen Fassade der Alleestrasse, jedoch mit grosser BIPV-Fläche, ist der Betrag bei ca. 140 CHF/m². Bei den Projekten Flumroc 140 CHF/m² und DeltaROSSO 45 CHF/m² ist der Planungsaufwand infolge des einheitlichen PV-Formats und Fassadenfläche tiefer.

Für die elektrische Installation (H) haben wir im Durchschnitt einen Anteil von 8% (100 CHF/m²) ermittelt. Für das Überwachungssystem (K) und die Wartung (L) ist der Kostenanteil nicht relevant (<1%).

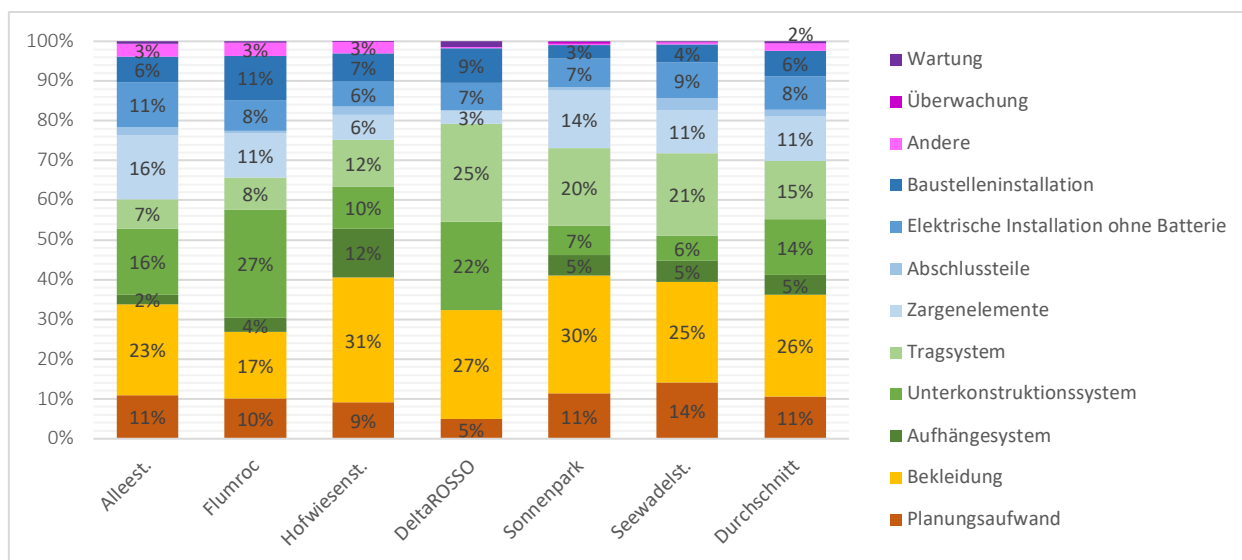


Abb. 8: Aufschlüsselung der BIPV-Hauptkostengruppen in Prozent

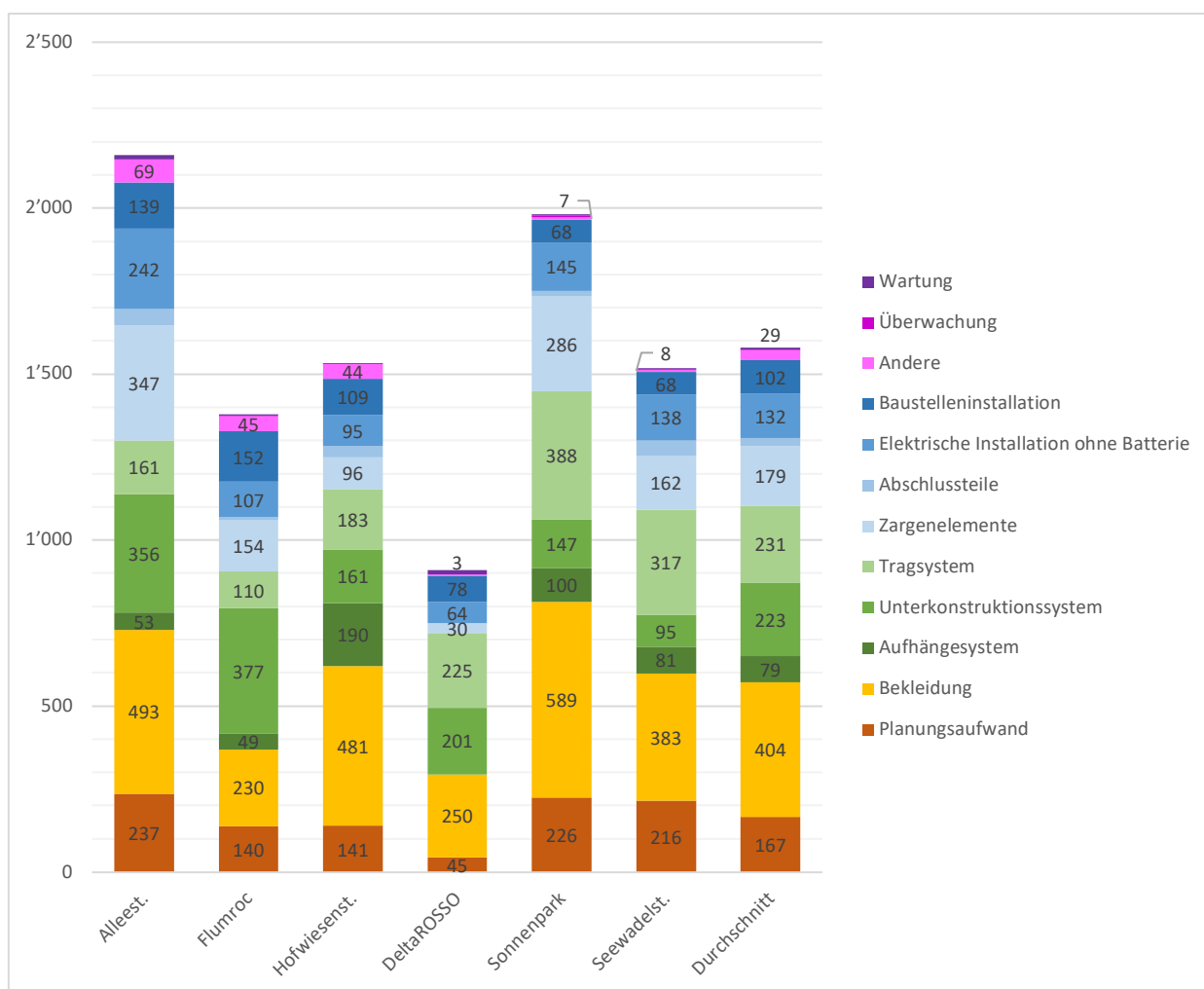


Abb. 9: Aufschlüsselung der BIPV-Hauptgruppen nach Kosten (CHF) pro Quadratmeter Referenzfläche

Da jede Fallstudie eine spezifische Besonderheit aufweist, lässt sich für die Gesamtkosten keine Lernkurve ableiten. Jedoch ist es möglich, für bestimmte Elemente vergleichende Trends zwischen den Projekten zu identifizieren. In Abb. 10 ist zum besseren Verständnis eine kurze Charakterisierung der BIPV-Fassaden der untersuchten Gebäude zusammengestellt.

	Kanton	Aussenwandsystem	Zellen	Modultechnologie	Batterie
Alleestrasse (2012)	TG	massivbauweise	c-Si, HIT	Glas/Folie, gerahmt	nein
Flumroc (2014)	SG	massivbauweise	Dünnschicht - CIS	Glas/Folie, gerahmt	nein
Hofwiesenstr. (2016)	ZH	massiv- /leichtbauweise	c-Si	Glas/Glas Keramikdruck	ja
DeltaROSSO (2017)	TI	massivbauweise	c-Si	Glas/Glas	nein
SonnenparkPLUS (2018)	ZH	leichtbauweise	c-Si	Glas/Glas	ja
Seewadelstr (2019)	ZH	leichtbauweise	c-Si	Glas/Glas Keramikdruck	nein

Abb. 10: Charakterisierung der BIPV-Fassade der ausgewerteten Gebäude

Die für jede Region der Schweiz unterschiedlichen Personalkosten, die Art der PV-Technologie, die Art des Trag- / Unterkonstruktionssystems und die Verwendung eines Speichersystems, um nur einige Beispiele zu nennen, beeinflussen die Gesamtkosten erheblich. Zudem sind die Kosten abhängig von der Menge des bestellten Materials und damit von der Grösse des Projektes. Trotzdem ermöglicht die



Analyse jedes Elementes und die Aufschlüsselung des BIPV-Prozesses, den Einfluss jedes einzelnen Elementes auf den gesamten Bauprozess zu identifizieren und deren Potential zur Kostenreduktion zu ermitteln.

Bemerkung zum BIPV-Bauprozess «Betrieb und Wartung»

Noch wenig Erfahrungen gibt es zu den Kosten in der Nutzungsphase. Hier können diese Elemente einen weitaus grösseren Anteil der Kosten ausmachen, als in der Planungs- und Bauphase. Weil in dieser Phase nicht nur Kosten anfallen können, sondern auch Ertragsausfälle drohen, ist dieser Aspekt für BIPV-Fassaden in Zukunft stärker zu beachten. Sollte sich das bestätigen, wird es interessant, Verbesserungen und kostensenkende Massnahmen für den Betrieb in die Planungs- und Bauphasen einfließen zu lassen.

2.4.2 Fassaden-Bekleidung

Die Bekleidung (B) (aktive und nicht aktive Bekleidung inkl. Logistik und Montage) ist mit einem Anteil von ca. 26% an den Gesamtkosten das teuerste Element einer BIPV-Fassade.

Die Analyse unterteilt die Bekleidung in aktive (BA) und nicht aktive (BB) Flächen. Die aktive PV-Bekleidung der analysierten Gebäude ist weiter unterteilt in Standardmodule und kundenspezifische Module. Standardmodule, die bereits in grossem Umfang kommerzialisiert wurden, reduzieren die Gesamtkosten. Kundenspezifische Module führen generell zu höheren Gesamtkosten. Darüber hinaus erfuhren in den letzten Jahren Standardmodule eine starke Preissenkung [2] (siehe Kapitel 10 «Referenz»).

Wichtig erscheint den Autoren jedoch, dass Standardmodule nicht immer als BIPV eingesetzt werden können. Sie entsprechen nicht den baulichen Anforderungen der EU-Bauproduktenverordnung, EU-BauPVO Nr. 305/2011 (Verordnung zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten). Es ist zu erwarten, dass in Zukunft die Normen im Bereich der Fassaden noch strenger werden.

Die Abb. 11 gibt eine Übersicht, der in den Fallstudien angewendeten Bekleidungssysteme. Die Kostenangaben enthalten nur die Materialkosten, d.h. ohne Logistik- und Montagekosten.

GEBÄUDE	Alleestr. 2012	Flumroc 2014	Hofwies. 2016	DeltaROSSO 2017	SonnenparkPLUS. 2018	Seewadel. 2019
aktive Bekleidung (BA) [CHF/m ²]	396	156	426*	316	531	336*
Standardmodule						
Kristalline Zelle	X					
Dünnschicht CIS		X				
Kundenspezifische Module						
Kristalline Zelle			X	X	X	X
Dünnschicht CIS						
Farbig			X			X
Nicht aktive Bekleidung (BB) [CHF/m ²]	516	120	471	80	503	270
Module ohne Zelle			X	X	X	X
Glas-Dummies	X					
Andere Materialien	X	X				

Abb. 11: Übersicht der angewendeten Bekleidungssysteme

* Gleiche Bekleidung vom gleichen Hersteller

Die Analyse der sechs Fallstudien ergab, dass der Preis für Standardmodule zwischen 156 CHF/m² für Dünnschichtmodule (Flumroc) und 396 CHF/m² für kristalline Module (Alleestrasse) variiert. Die Kosten für kundenspezifischen BIPV-Module variieren zwischen von 316 CHF/m² (DeltaROSSO) und 531 CHF/m² (Sonnenpark PLUS). 50% der analysierten BIPV-Module sind farbig.



Interessant sind die Fallstudien Hofwiesenstrasse und Seewadelstrasse. Es wurden die gleichen Arten von Photovoltaikmodulen verwendet, sowohl in Bezug auf Zelltechnologie, Materialien als auch Hersteller. Die drei Jahre später eingekauften Module der Seewadelstrasse waren rund 20% günstiger. Die Kostensenkung in den letzten Jahren war eine Folge der erhöhten Konkurrenzsituation unter den Modulanbietern und Optimierung der Prozessabläufe.

In einigen Fällen sind nicht aktive Bekleidungslösungen sogar teurer als aktive. Eine nicht aktive Fassadenbekleidungslösung versucht, das aktive Modul in Farbe und Ästhetik wiederzugeben. Dies ist vor allem bei der Verwendung von Standard PV-Modulen der Fall, wie z.B. bei der Alleestrasse, wo Bilder der Zellen auf das Glas gedruckt wurden. Diese Verfahren sind schwierig und kostenintensiv. Andere Lösungen bestehen aus nicht aktiven Bekleidungsmaterial wie Glas/Glas-Modulen (z.B. Hofwiesenstrasse) oder speziellen Pressplatten (Verwaltungsgebäude Flumroc).

Die nicht aktive Bekleidungsfläche von Fassaden und Dach der Fallstudie DeltaROSSO sind mit einer Glas/Glas-Standardverkleidung ausgestattet. Die Kosten für diese Lösung betragen 80 CHF/m² und entsprechen nur 25% der eingesetzten PV-Modulen.

Interessante Ergebnisse zeigt die Analyse der Kosten für die aktive Bekleidung, aufgeteilt nach Material und Arbeit. Hinweis: Die Kosten für die Logistik sind hier im Materialpreis enthalten (Lieferung zum Ort der Montage des Aufhängungssystems). Im Durchschnitt entfallen 85% der gesamten Verkleidungskosten auf das PV-Verkleidungsmaterial, während die Arbeitskosten nur 5% betragen (Abb. 12). Die Fallstudien mit den niedrigsten Kosten für BIPV-Module (Flumroc und DeltaROSSO) entsprechen den Fallstudien mit den höchsten Arbeitskosten in Prozent und als absoluter Wert pro Quadratmeter. Obwohl mit bemerkenswerten Unterschieden, ist der gleiche Trend in Abb. 13 zu sehen. Die Arbeitskosten erreichen 50% in den Fallstudien Flumroc und DeltaROSSO, in denen das nicht aktive Bekleidungsmaterial im Vergleich zu anderen Verkleidungslösungen erheblich billiger ist.

Für die Fallstudie konnte bei der Hofwiesenstrasse die Arbeitskosten, für die nicht aktive Bekleidungsfläche, nicht erfasst werden.

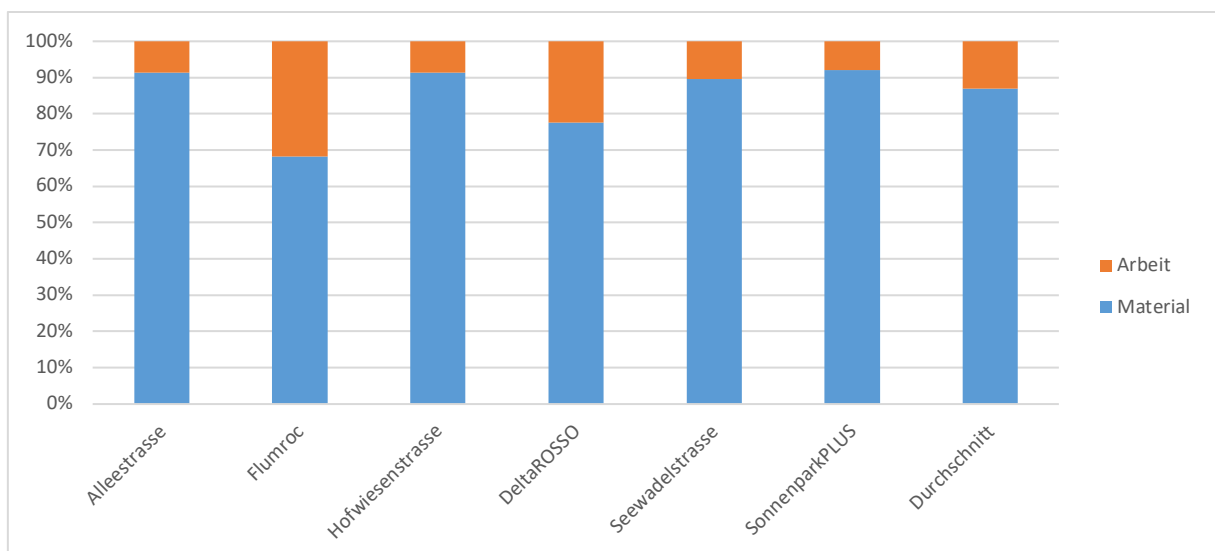


Abb. 12 Arbeits- und Materialkosten für die aktiven Bekleidungen

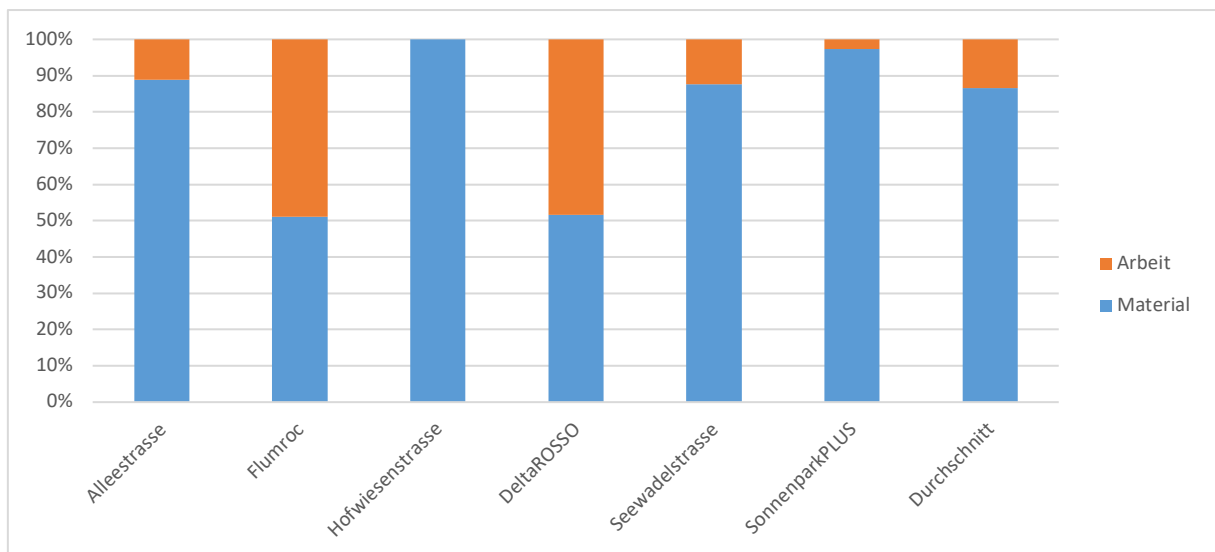


Abb. 13 Arbeits- und Materialkosten für nicht aktive Bekleidungen

2.4.3 Elektroinstallationen

In Anbetracht des gesamten analysierten Fassadenbauprozesses entfallen rund 8% auf Elektroinstallationen (H), die Wechselrichter, Leistungselektronik, Kabel, Batterien und Überwachungssysteme (Material, Logistik und Arbeitskräfte).

Eine signifikante Kostenreduktion bei der Elektroinstallation erscheint aus heutiger Sicht wenig wahrscheinlich, da die Verbesserungsspielräume gering sind. Die vom NREL [3] (siehe Kapitel 10 «Referenz») durchgeführte Analyse ergab, dass die BoS-Kosten (strukturelle und elektrische Komponenten) für PV-Anlagen im Zeitraum 2016-2018 nicht wesentlich gesenkt wurden.

Eine gute Planung der elektrischen Komponenten ermöglicht es jedoch, die Materialkosten zu senken und die Effizienz der Anlage zu optimieren. Nach dem Durchschnittswert der Fallstudien machen Wechselrichter und Verkabelungen etwa 80% der Kosten für die Elektroinstallationen aus (30% Wechselrichter und 50% Verkabelung).

Der Einbau eines Batterie-Speichersystems könnte den Preis der Elektroinstallation verdoppeln. Nur in zwei Gebäuden der analysierten Fallstudien, wurde ein Speichersystem installiert:

- Hofwiesenstraße: 95 CHF/m² ohne Batterien gegenüber 172 CHF/m² mit Batterien
- Sonnenpark PLUS: 145 CHF/m² ohne Batterien gegenüber 306 CHF/m² mit Batterien



3 Teilprojekt Prototyp für hohen Vorfertigungsgrad

3.1 Erreichte Ergebnisse, Erkenntnisse

Unsere Anforderungen an den Grad der Vorfabrikation konnte bei den Prototypen nicht im gewünschten Umfang realisiert werden. Das Zeitfenster für die Entwicklung und Anpassung der Unterkonstruktion bis zur Umsetzung des Projektes waren mit wenigen Monaten zu knapp, vor allem weil von Seiten der Ausführenden grosse Bedenken gegenüber der hohen Vorfertigung in der Werkstatt geäussert wurden.

Alle Beteiligten konnten jedoch wertvolle Erkenntnisse aus den gemachten Erfahrungen ziehen, insbesondere hinsichtlich jener Punkte, die im Prozessablauf für eine erfolgreiche Umsetzung einer hohen Vorfabrikation im Bereich der Unterkonstruktion mit Fokus der Kostenreduktion notwendig sind.

Die grösste Herausforderung bestand, wie beim Projektstart bereits erkannt, im Umgang mit den Toleranzen innerhalb der einzelnen Gewerke. Weiter legten die einzelnen Ausführungsunternehmungen eine gewisse Zurückhaltung an den Tag, die Herausforderung der hohen Vorfertigung anzunehmen. Die vor Projektstart definierten Toleranzen konnten von einzelnen Ausführungsfirmen aus unterschiedlichen Gründen nicht immer eingehalten oder aufgenommen werden. Dies hatte u.a. auch bei der Prototyp-Fassade einen unerwartet hohen Nachbesserungsaufwand bei der Unterkonstruktion zu Folge.

Das Projektteam muss anhand dieser Erfahrung davon ausgehen, dass bei jedem Bauvorhaben eine solche Situation eintreten kann. Das bedeutet, dass bei einer Vorfertigung für die Unterkonstruktion eine deutlich grössere Toleranz einzurechnen ist, als in der Planung anfänglich angenommen wurde. In der gemeinsamen Projekt-Review sind bereits gute Ansätze entwickelt worden, wie die einzelnen Systemelemente der Unterkonstruktion technisch für eine nachträgliche Justierbarkeit angepasst werden können.

Im Weiteren braucht es für eine erfolgreiche Umsetzung bzw. Einhaltung der vorgegebenen Toleranzen im Planungs- und Bauprozess für jeden einzelnen Ablauf- und Arbeitsprozess einen detaillierten Beschrieb mit den notwendigen Prüf- und Korrekturmechanismen. Die Definition der Toleranzen ist entsprechend dem Fortschritt der einzelnen Arbeitsgattungen auszurichten und zu verfeinern. D.h. jede Arbeitsgattung hat mit seinem Konstruktionssystem auf die im Bauprozess vorgängig erreichten Toleranzen zu regieren und die Toleranzspanne für die nachfolgenden Montageelemente weiter zu verkleinern, bis am Schluss die Modulposition entsprechend der in der Ausführungsplanung vorgegebenen Rasterung über eine letzte Feinjustierung passend gemacht werden können.

Diese arbeitsprozessorientierte, detaillierte Definition der Toleranzen ist notwendig, damit alle am Bauprojekt beteiligten Personen die Rahmenbedingung von Anfang an kennen und sich entsprechend mit Ihren System- und Ausführungstechniken danach orientieren können.

Neben einem gut organisierten Planungs- und Ausführungsteam, ist ein entsprechendes Kommunikationstool für den Austausch der Planungs- und Ausführungsergebnisse innerhalb des Projektteams notwendig. In Zukunft könnte das Arbeiten mit BIM ein wertvolles und effizientes Arbeitsinstrument bieten und den Prozess unterstützen.

3.2 Objektbeschrieb

Das Mehrfamilienhaus an der Seewadelstrasse 9 in Affoltern am Albis wurde im Jahr 1961 erstellt. Aufgrund der strukturellen Nachteile des bestehenden Gebäudes, hat die Eigentümerschaft (Private) entschieden, den Altbau durch einen Ersatzneubau mit 14 Wohnungen zu ersetzen.

Der Ersatzneubau ist ein kompaktes dreigeschossiges Gebäude mit einem dreiseitig rückspringenden Attikageschoss. Das Gebäude liegt parallel entlang der Seewadelstrasse. Von der Strasse abgewendet, auf der Südostseite des Gebäudes, befinden sich die Terrassen/Balkone der Wohnungen. Die Tiefgarage ist über eine überdachte Rampe von der Strassenseite her erschlossen. Pro Geschoss



sind vier Wohnungen durch das innenliegende Treppenhaus mit Aufzug erschlossen. Der Nasszellenkern ist kompakt und zentral in der Gebäudemitte angeordnet.

Die Konstruktion des Gebäudes ist eine Mischbauweise. Der Treppenhauskern und die Wohnungstrennwände werden vom Unter- bis zum Attikageschoss in Stahlbeton ausgeführt. Die Geschossdecken sind ebenfalls, mit Ausnahme der obersten Dachkonstruktion, in Stahlbeton ausgeführt. Die Betondecken werden entlang der Fassade mit Betonstützen statisch abgestützt. Die Aussenwände und die Dachkonstruktion vom Attikageschoss sind in Holzbauweise ausgeführt, mit einem hohen Vorfabrikationsgrad. Alle tragenden Innenwände mit Ausnahme im Dachgeschoss werden in Backstein oder Beton und alle nicht tragenden Innenwände in Gipsleichtbau ausgeführt.

An Stelle einer verputzten Fassadenhaut wurde allseitig eine vorgehängte hinterlüftete Fassadenkonstruktion mit einer solaraktiven Glasbekleidung verwendet.

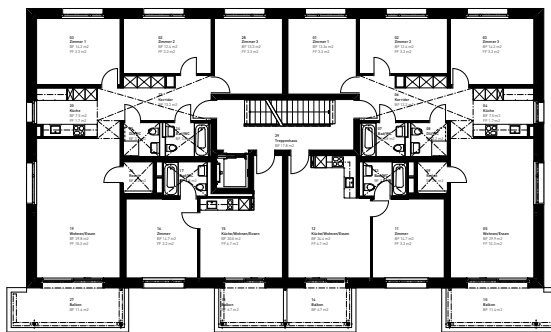


Abb. 14: Normalgeschoss



Abb. 15: Südostfassade mit der Balkonschicht

3.3 Schlüsselstellen

Die ermittelten Schlüsselstellen bei einer BIPV-Fassade in Verbindung mit hoher Vorfabrikation sind:

- Bestimmen eines Projekt- und Koordinationsverantwortlichen für die BIPV-Gebäudehülle
- Frühe Definition der Toleranzen für jeden einzelnen Ablauf- und Arbeitsprozess inkl. Angaben der notwendigen Prüf- und Korrekturmechanismen.
- Detaillierte und informative Ausführungsplanung auf einer vorgängig gemeinsam definierten Basis; alle Information aus den einzelnen Planungsteams sind für alle zentral zugänglich festzuhalten.
- Einheitliche und einfache Detaillösungen erarbeiten und dazu die entsprechenden Ressourcen bereitstellen.
- Unterkonstruktionssystem muss konstruktiv so ausgerüstet sein, dass dieses in allen Achsen innerhalb der definierten Toleranzen mit einfachen Handgriffen nachträglich justiert werden kann.

3.4 Planung und Bauablauf

Die Ausführungsplanung Holzelementbau und Fassadenkonstruktion wurden Ende August 2018 abgeschlossen. In den ersten beiden Wochen im November 2019 wurde die Aussenhülle und das Attikageschoss mit vorfabrizierten Holzbaulemente aufgerichtet und vom Februar bis Juni erfolgten die Montagearbeiten an die Fassadenbekleidung. Die BIPV-Fassade liefert ab Mitte Juli 2019 Strom.

Die Bauarbeiten beim MFH Seewadelstrasse wurde bis Ende August 2019 abgeschlossen. Der Wohnbezug fand ab dem 1. Oktober 2019 statt.



Die gesamte Planungszeit wie auch Bauausführung entsprach den Projektvorgaben, es gab diesbezüglich keine Verzögerungen.

3.5 Bedürfnisse und Anforderungen für hohen Vorfabrikationsgrad

Neben den bekannten Anforderungen für einen hohen Vorfabrikationsgrad, wie detaillierte Ausführungsplanung, Definition der Schnittstellen und Toleranzen der einzelnen Gewerke, Transportfähigkeit usw., kommt bei einer vorgängigen Montage der Unterkonstruktion in der Holzwerkstatt, die sehr hohe ästhetische Anforderung der Platzierung der Bekleidungselemente (Photovoltaikmodule) dazu.

Dies beinhalten für den nachfolgenden Bauablauf folgende Risiken:

- Ästhetik: genaues Ausrichten der Module / Fluchten
- Lange Vorlaufzeiten Modulproduktion: Keine nachträglichen Anpassungen möglich
- Flexibilität der vormontierten UK: begrenzte Möglichkeiten, Bautoleranzen auszugleichen

Unregelmässigkeiten bei der Aufhängung der Bekleidungselemente lassen sich fast nicht mehr nachträglich kaschieren. Vor allem nicht, wenn in einem effizienten Projektprozessablauf die PV-Modulen frühzeitig bestellt werden, auf Grund der Lieferfristen.

Das bedeutet, dass die Art-des Unterkonstruktionssystems kritisch ist und für eine Vorfabrikation spezielle Eigenschaften aufweisen muss.

Beim MHF Seewadelstrasse wurde eine Fassadenbekleidung mit einer nicht sichtbare Befestigungstechnik gewünscht. Die einzelnen Fassaden-Platten sind allseitig mit einer nominell 8 mm (+/- 2 mm) breiten Fuge in der Fassadenfläche zu platzieren. Die bauüblichen Anschlussdetails zu Fensterargen, Blechverkleidungen etc. sollten systemtechnisch gelöst sein.

Die grundsätzlichen Anforderungen an eine vorgehängte hinterlüftete Fassade gelten auch für hinterlüftete PV-Fassaden. Massgeblich sind drei harmonisierte EU-Normen:

- Eurocode EC-1: EN 1991-1-1 - Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke, Eigengewicht der Tragwerke
- Eurocode EC-1: EN 1991-1-4 – Allgemeine Einwirkungen, Windlasten
- Eurocode EC-9: EN 1999-1-1 – Konstruktion von Aluminiumtragwerken

Gegenüber einer bewährten hinterlüfteten Fassadenkonstruktion (VHF) erfordert eine hinterlüftete BIPV-Fassade eine Reihe zusätzlicher Anforderungen:

- Zugänglichkeit der Fassadenelemente für die Verkabelung während der Montage, sichere mechanische Halterung des PV-Moduls in dieser Lage
- Zugänglichkeit der Fassadenelemente für Servicearbeiten, insbesondere wenn Optimizer eingesetzt werden, sowie für einen Modul-Ersatz
- Aufnahme der Kabel und Schutzrohre, inkl. Zugentlastung
- Sichere und trockene Fixierung der elektrischen Steckverbindungen

Denen gegenüber ergeben sich nochmals zusätzlichen Herausforderungen an diese Tragkonstruktion.

- Durchgängigkeit bzw. die Übergänge der Unterkonstruktion zwischen den einzelnen Elementstössen der einzelnen Fassadenelemente ist zu gewährleisten



- Umgang mit den Toleranzen des Rohbaus und Holzelementbaus (SIA 144/1 «Masstoleranzen im Bauwesen – Begriffe, Grundsätze und Anwendungsregeln» und 414/2 «Masstoleranzen im Bauwesen»).
- Kostengünstige und einfache Vormontage, die den Bauprozess und die Transportlogistik des Holzbauers nicht wesentlich beeinträchtigt.

Dominierendes Thema bei der Beurteilung und Wahl der Unterkonstruktion ist die Aufnahme von Toleranzen bei der Montage. In der Planungsphase wurden die verschiedenen Bautoleranzen abgeschätzt, planerisch eingegrenzt und als Anforderung über die gesamte Fassade bereits in der Beschreibung spezifiziert:

x-Richtung: $\pm 10 / 5$ mm je nach Fassadenlänge

y-Richtung: $\pm 10 / 15$ mm je Gebäudehöhe

z-Richtung: ± 2 mm

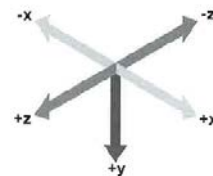


Abb. 16: Montageschema (Quelle: Hilti)

3.6 Evaluation und Wahl der Unterkonstruktion

Im Rahmen des Projektes wurde eine Unterkonstruktion von der Firma Ernst Schweizer AG sowie zwei marktgängige Systeme von Drittanbietern evaluiert und bewertet. Zusätzlich zu den Kriterien in Kapitel 3.5 sind eine Reihe kommerzielle und logistische Kriterien in die Beurteilung eingeflossen:

- Anzahl Systemteile
- Liefer- und Dienstleistungsangebote
- Art der Verklebung der Backrails auf dem PV-Fassadenmodul, Logistik, Zertifizierung
- Baustellenlogistik

Die Projektteilnehmer haben sich aus folgenden Gründen für das Montagesystem KA-Solar der Firma Ecolite AG entschieden:

1. Innovation (Acryltape statt SSG, Federmechanismus, Situation aufgeklappte Module, keine Fixierung gegen Wandern der Module in x-Richtung notwendig)
2. Relativ geringe Anzahl Teile, insbesondere bei den Systemprofilen
3. Hoher Vorfertigungsgrad bei den gelieferten Teilen des Unterkonstruktionssystems
4. Intensive Unterstützung während Planung und Ausführung zugesagt
5. Hersteller zeigte sich sehr offen für weitere Entwicklung
6. Ansprechende Preise



Systemlösung KA-Solar, Ecolite AG

Charakteristische Eigenschaften:

- Speziell für PV-Fassaden, Ergänzungs-System zu Standard Unterkonstruktion für hinterlüftete Fassaden
- Wandseitig horizontales Hutprofil
- Horizontalprofile werden direkt auf Fassadenmodule aus Holz aufgebracht
- Ausgleich in z-Richtung mit Unterlagen
- Vertikales Einhängeprofil, ergibt x-Position
- Positionieren in y-Richtung durch Einsetzen der Dreh- und Einhängebeschläge.
- Spezielles Backrail-Profil
- Verklebung der Backrails mit Acryl-Tape, zertifizierte Produktion erforderlich
- Mechanische Sicherung der Klebefugen auf Scherung
- Drehpunkt unten, Einhängepunkt oben, in Backrail integriert
- Modul ist im unteren Drehpunkt gesichert, was die DC-Verkabelung im eingehängten Zustand ermöglicht
- Fixierung der Module nach Einhängen durch Federmechanismus
- Montage/Demontage Fassadenmodule einzeln möglich



Abb. 17: 3D-Ansicht System KA-Solar

3.7 Zusammenarbeit und Schnittstellen

Bereits in der Bauprojektphase wurden die Schnittstellen und die Verantwortlichen innerhalb des Planungsteams, basierend auf die Erfahrung der ausgeführten BiPV-Fassaden von Viridén + Partner AG definiert.

An einer gemeinsamen Startsituation, zeitlich vor dem Start der Ausführungsplanung, wurde mit allen an der Fassadenkonstruktion beteiligten Akteuren eine Auslegeordnung erstellt. Gemeinsam zwischen Architekt, Totalunternehmer, Holzbau-Ingenieur, Fassaden-, Holzbau- und PV-Elektroplaner, Systemlieferant Unterkonstruktion und ausführende Unternehmer vom Holz- und Fassadenbau wurden die Anforderungen für eine hohe Vorfabrikation bestimmt und die einzelnen Schnittstellen definiert.

Von Seite der Ausführenden wurden grosse Bedenken gegenüber der hohen Vorfertigung in der Werkstatt geäussert. Es betrifft vor allem die geringen Toleranzen in der Fassadenbekleidung auf Grund der komplexen Architektur der Gebäudehülle, wie Fensterrasterung, Balkonschicht, An- und Abschlüsse beim Attikageschoss usw. Es wurde entschieden die einfachere Südwestfassade (Stirnseite) als Prototyp zu nehmen. Auf die Vormontage der Fensterzargen wird verzichtet.

Damit die Kommunikation, Qualitätssicherung und Koordination während der Planungsphase und Realisierungsphase der Akteure einwandfrei gewährleistet ist, wird ein Projekt- und Koordinationsverantwortlicher für die Gebäudehülle Fassade bestimmt. In diesem Fall der projektleitende Architekt von Viridén + Partner AG.



Im Weiteren wird festgelegt, dass alle relevanten Information konzertiert und für alle zugänglich in der Arbeitsvorbereitung (AVOR) des Holzbauers und des Fassadenbauers aufgenommen und festgehalten werden.

3.8 Ausführungsplanung

In der Ausschreibungsphase wurden die einzuhaltenden Masstoleranzen für die Arbeitsgattungen Baumeister und Holzbau im Grundriss und in den Detailschnitten festgelegt. Der Umgang mit den Masstoleranzen war ein wichtiges Vergabekriterium und wurde auch im Werkvertrag entsprechend festgehalten.

Bereits in den Ausschreibungsplänen hatten die Architekten in den Planunterlagen eine Bezugsebene definiert. Diese stellt eine imaginiere Masslinie dar, welche konsequent in allen Grundrissen, Fassaden- und Detailpläne mit einer separaten Farbe (rot) gekennzeichnet ist. Diese definierte Bezugsebene wurde geflissentlich in den Ausführungsplänen des Architekten und in den Avor-Plänen des Holzbauers, Fassadenbauers und Fensterbauers übernommen und später auch auf den Rohbau übertragen. Neben den Bezugsebenen wurden auch die Höhenangaben durchwegs in allen Planunterlagen festgehalten.

Die Verantwortlichkeit für die Richtigkeit der definierten Bezugsebene und Höhenangaben in allen Plangrundlagen hatte der Projekt- und Koordinationsverantwortlichen für die Gebäudehülle Fassade. Die Übertragung auf den Bau erfolgt in der Verantwortung der Bauleitung zusammen mit den ausführenden Unternehmungen.

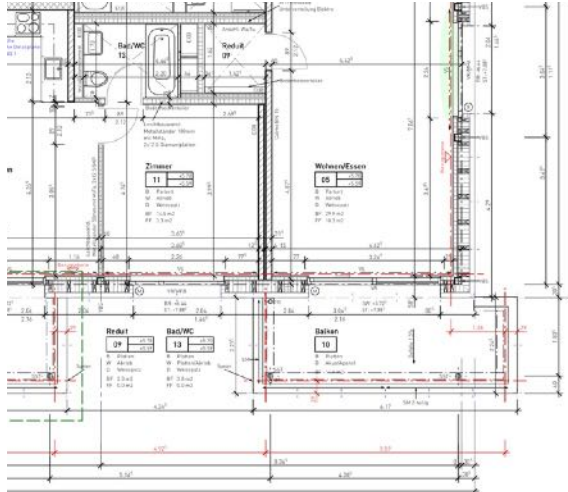


Abb. 18: Werkplan mit rot eingezeichneter Bezugsebene

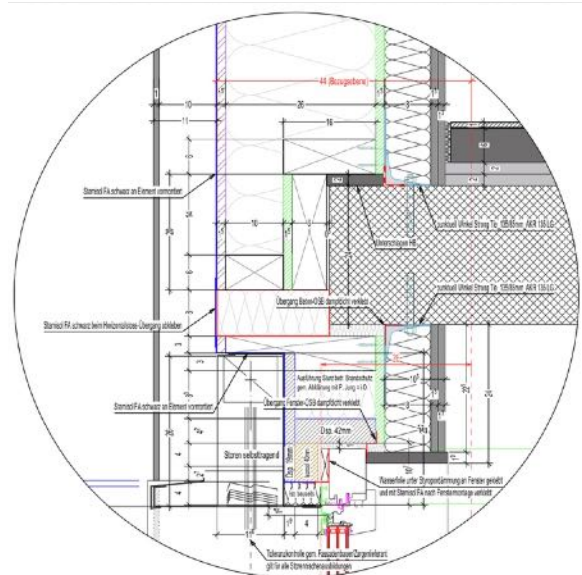


Abb. 19: Avor-Pläne Holzbau mit rot eingezeichneter Bezugsebene

Vor dem Start der Avorplanung von Holz- und Fassadenbauer wurde zusammen mit dem Projekt- und Koordinationsverantwortlichen die Grösse und Schnittstelle jedes einzelnen Holzfassadenelementes bei der Prototyp-Fassade definiert. Folgende Kriterien wurden berücksichtigt:

- Positionierung und Position des Unterkonstruktionssystems auf den einzelnen vorfabrizierten Holzfassadenelemente (Unterkonstruktion: darf nicht über die Elemente geführt werden).
- Statische Rahmenbedingungen, Abstimmung zwischen Anforderung Holzelementbau und hinterlüfteten Fassadenkonstruktion, wie z.B. Position Ständer Holzbau und Befestigungspunkte Unterkonstruktion.



- Anforderungen der Gestaltung der Fassadenhülle, wie Zargenausbildungen Fenster, Gebäudeecken, Sockel- und Dachrandabschlüsse, Balkonbrüstungen haben Einfluss auf die konstruktive Umsetzung
- Umgang mit den Elementstössen, vertikal und horizontal, Schnittstellen zwischen werk- und bau-seitiger Montage
- Lager- und Transportfähigkeit der Elemente -> Gefahr von Transportschäden durch Einhängen

3.9 Bau Prototyp Südwestfassade in der Werkstatt

Als Vorbereitung wurde pro Holzbauelement ein Plan mit Grundriss, Ansicht und Schnitt erstellt, ein sogenannter Werkplan, auf dem alle relevanten Informationen wie Konstruktionsaufbau und Beschrieb Holzelement, relevante Angaben der Unterkonstruktion wie Definition der Profile inkl. Positionsnummer, Achsabstände usw.) für eine effiziente Montagearbeit in der Werkstatt vorhanden sind.

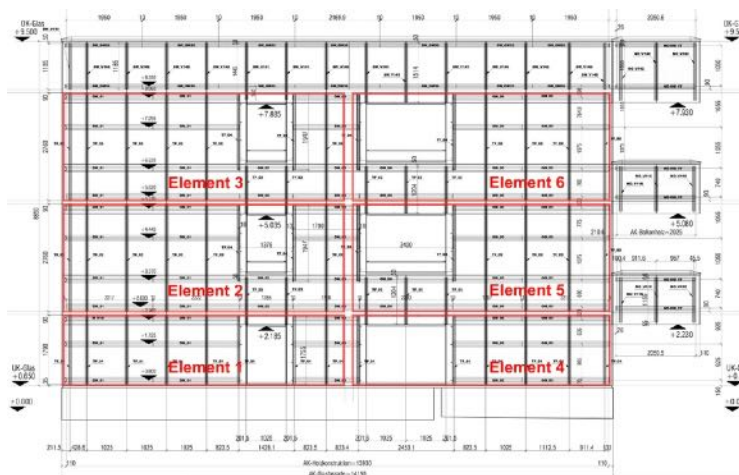


Abb. 20: Südwestfassaden mit den eingezeichneten Holzbauelementen Prototyp Vorfabrikation Unterkonstruktion

Montageablauf

In der Holzwerkstatt wurden jeweils drei vorgefertigte Fassadenelemente (z.B. Element 1 bis 3) in der Werkhalle des Holzbauers durch den Holzbauer horizontal ausgelegt und über die gesamte Gebäudehöhe zueinander ausgerichtet. Die Position, der nicht mehr sichtbaren vertikalen Holzständer, wurde vorgängig durch den Holzbauer markiert, damit die Befestigungspunkte für die Unterkonstruktion einfach erkennbar sind.

Die einzelnen Unterkonstruktionsschienen wurde auf Mass gefertigt, nach Typen geordnet und entsprechend nach Position beschriftet vom Lieferanten des Unterkonstruktionssystems in die Werkstatt geliefert.

Die Montage der Unterkonstruktion erfolgte durch den projektverantwortlichen Architekten von Viridén + Partner AG und Mitarbeiter der Entwicklungsabteilung von Ernst Schweizer AG in der Rolle des Fassadenbauers.

Der Lieferant der Unterkonstruktion war für die Einweisung der Montagearbeiten ebenfalls vor Ort. Als erstes wurde die Position (Achsmass) der 1. Lage der Unterkonstruktion anhand der vorliegenden Werkpläne des einzelnen Holzbauelementes auf den vorgefertigten Fassadenelementen übertragen.



Abb. 21: Drei Holzfassadenelemente sind auf Böcke gelegt, bereit für Vormontage der Unterkonstruktion



Abb. 22: Montage der horizontalen Hutprofile

Montage Horizontalprofile, Toleranzen:

Die Horizontalprofile werden in die vertikalen Holzträger verschraubt. Zum Einsatz kommen spezielle Holzschrauben mit einer Metallbohrspitze. Ein Vorbohren der Aluminiumprofile ist deshalb grundsätzlich nicht notwendig.

In z-Richtung wird eine Unterlage von 5 mm eingefügt, auf Grund des vorgängig definierten Toleranzabstandes. Die Position der Horizontalschiene in y-Richtung hat keine besonderen Anforderungen bezüglich Toleranzen. Jedoch müssen zu den Ausschnitten für Fenster- und Türzargen entsprechende Abstände gemäss Avorplanung Fassadenbauer eingehalten werden.

Zur Kompensation der unterschiedlichen, temperaturbedingten Ausdehnung der Materialien werden die Profile mit einer maximalen Länge von 1800 mm eingesetzt. Sie werden an zwei Punkten in der Profilmitte fest verschraubt (Fixpunkte). Alle weiteren Verschraubungen werden als Gleitpunkte ausgebildet. Dazu werden die Befestigungslöcher vor Ort ausgeweitet.

Montage Vertikalprofile, Toleranzen:

Anschliessend wurden die Vertikalprofile entsprechend der Massangaben im Werkplan eingemessen. Die Profile wurden zudem über die drei Holzfassadenelemente in der Flucht ausgerichtet. Dabei wurde eine Toleranz von maximal ± 2 mm in x-Richtung zum vertikalen Achsmass angestrebt. Das Vertikalprofil wurde so unter Einhaltung von Fix- und Gleitpunkten auf die Horizontalschienen genietet. Zur Kompensation der unterschiedlichen, temperaturbedingten Ausdehnung der Materialien werden die Profile mit einer maximalen Länge von 3000 mm eingesetzt. Sie werden an zwei Punkten in der Profilmitte fest vernietet (Fixpunkte). Alle weiteren Nieten werden als Gleitpunkte ausgebildet. Dazu werden die Nietlöcher mit einem grösseren Durchmesser vorgebohrt und die Nieten mit einem Vorsatz auf der Nietpistole gesetzt.

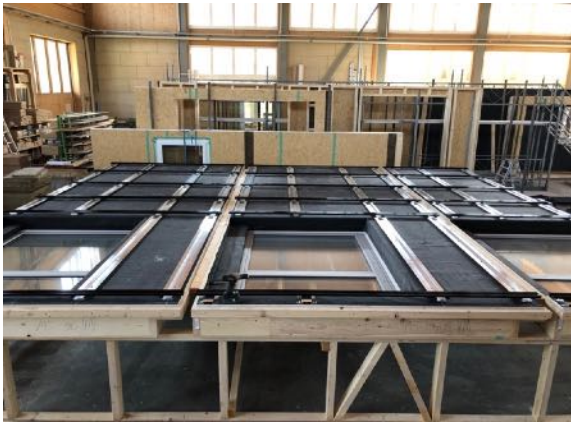


Abb. 23: Montage nach Abschluss der vertikalen Einhängprofile der Unterkonstruktion



Abb. 24: Die Holzfassadenelemente werden nun direkt auf das Transportbock geladen.

Zeitbedarf / Logistik

Die Unterkonstruktion für die sechs Fassadenelemente wurden innerhalb eines Tages montiert.

- Elemente 1-3 von 9 – 12 Uhr, 3 Personen (zeitweise zuzüglich Instruktor), inkl. Einrichten und Instruktion. Das Anzeichnen der Schienenpositionen erfolgte bereits im Voraus.
- Elemente 4-6 von 13 – 17 Uhr, 2 Personen, inkl. Auslegen und Ausrichten der Elemente, Anzeichnen der Schienenpositionen und Aufräumen.

Für ein geschultes Team ist für eine Vormontage in dieser Grössenordnung (Fläche 108 m² inkl. Fensterfläche, aufgeteilt in 6 Elemente) demnach mit einer Gesamt-Montagezeit von ca. 16 Arbeitsstunden zu rechnen, d.h. umgerechnet auf 1m² BIPV-Fassade weniger als 10 Minuten.

Eine weitere Voraussetzung ist eine gut funktionierende Montageablaufplanung zwischen Produktion Holzelemente, Montage Unterkonstruktion und Zwischenlagerungen. Bei unserem Prototyp wurde die Montage der Unterkonstruktion in der Werkstatt noch durch den Fassadenbauer ausgeführt. In Zukunft kann diese Leistung von der Holzbaufirma selber übernommen werden, womit sich Montageabläufe und Logistik wesentlich vereinfachen.



Abb. 25 bis 27: Beladen der Holzbau-Fassadenelementen auf das Transportgefährt.



Entgegen den vorausgehenden Befürchtungen beeinträchtigen die vormontierten Schienen die Logistik der Elemente kaum. Sie werden mit der Schienenseite gegeneinander auf den Transporter gestellt und gesichert. Lediglich in der Tiefe muss der Platzbedarf für die Schienen berücksichtigt werden.

3.10 Montage Fassadenelemente und Resultate der Vermessung am Bau

Der Rohbau wurde innerhalb der vorgegebenen Toleranzen umgesetzt. Ein beauftragter Geometer hatte Massgenauigkeit der einzelnen Ausführungsetappen (geschossweise) laufend überprüft. Im gleichen Arbeitsgang hatte er, die in den Planunterlagen definierten Bezugsebenen, auf die ausgeführten Rohbaubaulemente übertragen. Diese Referenz war wieder der Ausgangspunkt für die nachfolgenden Ausführungsetappen. Der Kostenaufwand für diese Überprüfungen war gering und hatte sogar Vorteile für alle nachfolgenden Arbeitsgattungen, bedingt durch die hohe Massgenauigkeit des Rohbaus.

Dokumentation der Fassadenmontage

Der Montagestart der Südfassade (Prototyp mit vormontierter Unterkonstruktion) fand am 5.11.2018 statt, Start 7:00 Uhr. Die Fassade war in weniger als einem halben Tag montiert und ausgerichtet



Abb. 28 bis 31: Montage der Holzfassaden-Elemente



Ergebnisse der Vermessung und Toleranzen am Bau

Die beim Holzbauer in der Halle vormontierte Unterkonstruktion wurde nach dem Einbringen der Fassadenmodule bezüglich der am Bau eingezeichneten Bezugsebene vermessen. Kritisch ist die genaue Position der vertikalen Einhänge-Schienen.

Die Grafik (Abb. 32) zeigt die Abweichungen der 12 über die Fassade positionierten, vertikalen Einhänge-Schienen zum Planmass bezüglich der Bezugsebene.

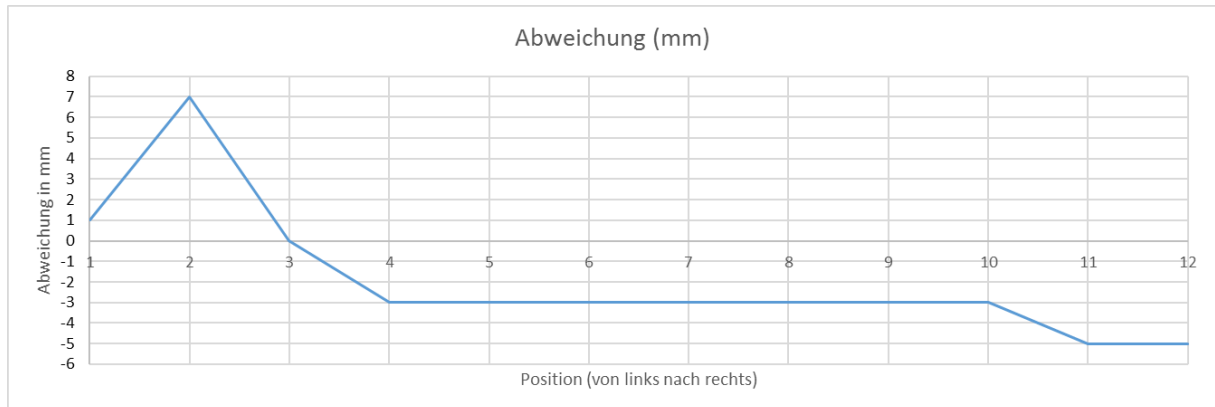


Abb. 32: Abweichungen der vormontierten Unterkonstruktion (Vertikalprofile) von der Planposition.

Es wurden verschiedene Planabweichungen festgestellt:

- Systematische Abweichung in x-Richtung von -3 mm.
- Ein Positionsfehler in x-Richtung bei der Vorfertigung an Position 2 mit einem Fehler von 10 mm bezüglich der systematischen Abweichung von -3 mm. (mögliche Ursache: Zahlendreher.)
- Eine Vergrößerung der systematischen Abweichung zum rechten Rand der Fassade auf -5 mm.
- Abweichungen im Lot (y-Richtung): Trotz Vormontage mit der Ausrichtung an den jeweils drei übereinanderstehenden Fassadenelementen stimmte die Flucht der vertikalen Profile von einem Stock zum nächsten am Bau dann nicht mehr.
- Abweichungen in der z-Richtung: Die Fassadenmodule waren nach dem Einbau überraschend stark bombiert ca. +/- 4 mm.

Notwendige Korrektur-Massnahmen

Folgende Korrekturen mussten am Bau vorgenommen:

- Schiften der horizontalen Profile in z-Richtung zum Ausgleich der Wölbungen der Fassadenmodule (Befestigungsschraube lösen, schiften und wieder neu befestigen)
- Korrektur und Anpassung der Position der vertikalen Einhängprofile in y-Richtung (Aufbohren der Nietenverbindung und wieder neu setzen)
- Z.T. Ausrichten der vertikalen Profile, damit sie über die Geschosse in der y-Richtung auf der gleichen Flucht sind.

Der Gesamtaufwand der Massprüfung und der Korrektur war mit 36 Arbeitsstunden sehr hoch. Dieser Aufwand steht in keinem Verhältnis zum Montageaufwand in der Holzwerkstatt.



Ursachen der Massungenauigkeiten

Die genauen Ursachen für die "Welligkeit" der gemäss Plan gefertigten Fassadenmodule des Holzbauers ist nicht abschliessend bekannt. Aber offenbar muss mit diesen Abweichungen gerechnet werden.

Die systematischen Abweichungen in den x-Positionen der vertikalen Profile ist wahrscheinlich auf Grund der Toleranz/Abweichung zwischen den Baumassen und Planmassen entstanden. Trotz Ausrichten der Vertikalprofile in der Halle bei der Vorfertigung, war die Ausrichtung am Bau nicht mehr im Winkel.

3.11 Bekleidungselemente Fassade / Glas/Glas-Photovoltaikmodul

Verklebung der Backrails auf das Glas/Glas-Photovoltaikmodul

Das Verkleben mit Acrylschaum ist eine attraktive Variante zum «Structural Sealant Glazing» (SSG). Silikonverklebungen brauchen relativ langen Aushärtezeiten. Das erfordert einen hohen Logistikaufwand und vor allem viel Platz. Acrylschaum hat sofort ausreichend belastbare Haftung und die geklebten Elemente können sofort und ohne Trocknungszeit für den Transport verpackt werden.

Für die Qualitätssicherung gelten grundsätzlich ähnliche Anforderungen. Während SSG jedoch durch internationale Normen spezifiziert ist und nur von zertifizierten Anwendern eingesetzt werden darf, sind die Acrylschaum-Produkte und deren Verarbeitung durch herstellerabhängige Prüfungen und eine spezifische Freigabe durch den Lieferanten abgesichert.

Für das vorliegende Projekt wurden deshalb die Verklebungen der Haltevorrichtung (Backrails) an die PV-Fassadenelementen von einer Spezialfirma durchgeführt. Vorab hat der Hersteller des Acrylschaum-Tapes Klebetest mit PV-Fassadenmustern durchgeführt.

Ausführung und Logistik

Die Backrails wurden durch den Lieferanten der Unterkonstruktion komplett vorgefertigt angeliefert. Die Vorgaben lieferte der Fassadenplaner mit einer entsprechenden Zuschnittliste. Das Acrylschaum-Tape wurde nach Vorgabe auf die Backrails aufgebracht und für die weitere Verklebung mit den PV-Fassadenelementen bereitgestellt.



Abb. 33: Vorbereitete Backrails, einseitig mit Acrylschaumtape belegt.

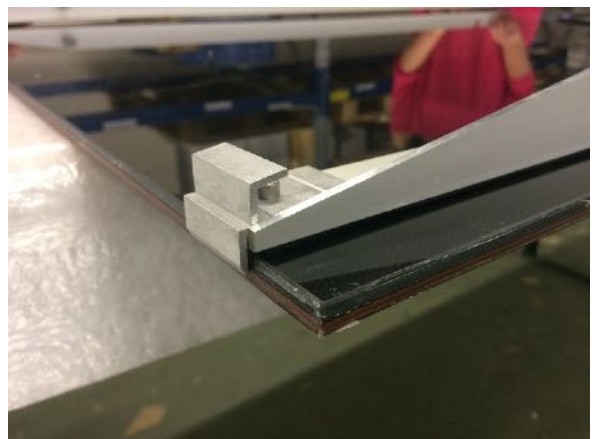


Abb. 34: Mechanische Sicherung der PV-Gläser durch Auflage an der unteren Glaskante



Abb. 35: Vom Modulhersteller angelieferte PV-Fassadenmodule



Abb. 36: Verkleben der Backrails auf der Rückseite des PV-Moduls.

Masshaltung und Toleranzen des Backrailsystems

Die Position der zwei Backrails ist durch den Fassadenplaner mit sog. «Klebebilder» festgelegt. Diese sind bezogen auf die Glaskante der PV-Module vermasst. Die Position der Backrails wird mit der Schiebelehre (siehe Abb. 36) eingemessen. Backrails müssen passgenau auf die vormontierten Vertikalprofile der Unterkonstruktion passen. Bei der Verklebung ist eine Toleranz von $\pm 2\text{mm}$ zulässig.

Bei einigen wenigen gelieferten PV-Modulen gab es Probleme mit verdrehten Gläsern, sprich Front- und Rückglas waren nicht sauber übereinander. Eine solche Verschiebung der Gläser kann bei der Montage der Module mit dem Unterkonstruktionssystem nicht korrigiert werden.

Endmontage der PV-Fassadenmodule am Objekt

Stichworte zur Montage der PV-Module:

- Die Einhängepunkte im vertikalen Einhängeprofil können einfach montiert werden.
- Einhängen der PV-Fassadenmodule ist sehr einfach.
- Beim Setzen der Anker und Einhängepunkte vertieft sich die Schraube in das Alu-Profil. Damit wird ein Nachjustieren in der y-Achse im Bereich von $\pm 4\text{ mm}$ verunmöglicht; die Schraube zieht immer wieder in diese Vertiefung. Somit ist eine Feinjustierung in der y-Achse nur begrenzt geben und hat noch Potential für Verbesserungen.
- Verdrehungen der Solargläser übereinander können nach dem Einhängen nicht mehr ausgeglichen, korrigiert werden. Das Risiko dazu kann durch eine entsprechende Spezifikation des Bestellers reduziert werden.



Abb. 37 bis 39: Einhängebeschläge oben, Drehpunkte unten sowie Feder zum Fixieren des PV-Fassadenmoduls.

Stichworte zur Elektroinstallation DC-seitig im Bereich der hinterlüfteten Fassadenkonstruktion:

- Die Zuleitungen sind alle in Schutzrohre graues Rohr auf der horizontalen Unterkonstruktion verlegt, siehe Abb. 40.
- Die Anschlussleitungen zwischen den Strings sind ebenfalls innerhalb der Unterkonstruktion verlegt, siehe Abb. 40 und 41.
- Der Zusammenschluss der einzelnen Module ist problemlos, vorausgesetzt die Kabellänge der Anschlussbox auf dem Modul sind genügend lang. Es hat sich gezeigt, dass relativ häufig eine diagonale Verbindung von einer Modulreihe zur nächsten erfolgen kann, welche bei der Spezifikation der Module berücksichtigt werden sollte.
- Eine Vormontage der Elektroinstallationen, Versträngung der Module ist auf Grund der Anzahl Holzmodulelemente nicht praktikabel und bringt keinen zeitlichen und finanziellen Vorteilen

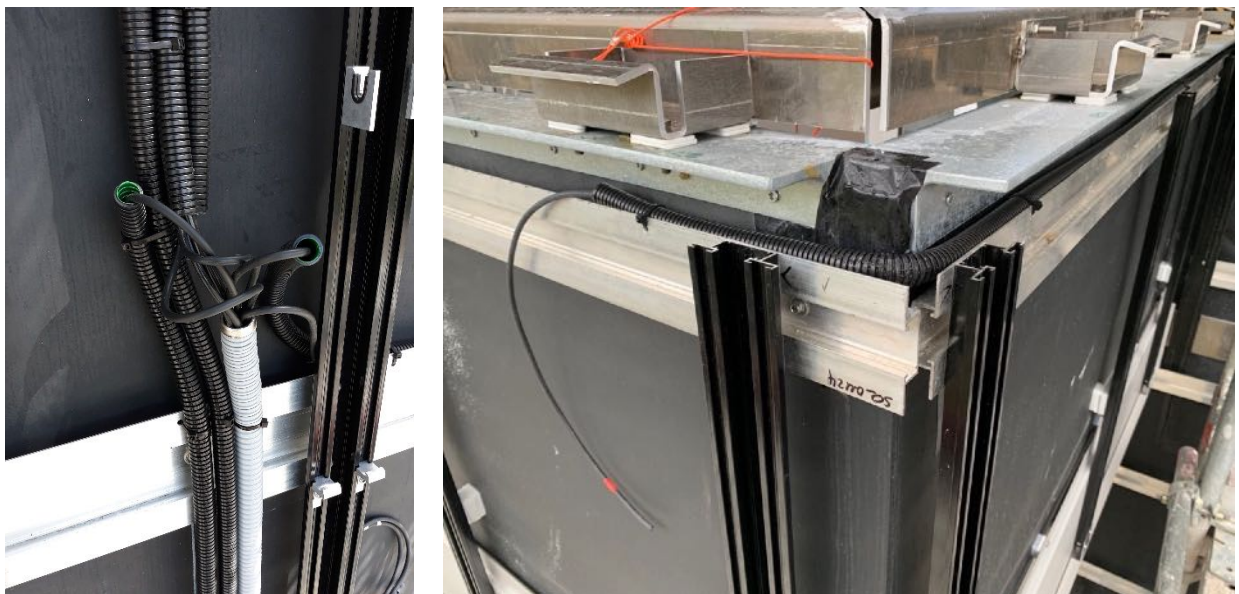


Abb. 40 und 41: Elektroinstallationen im hinterlüfteten Raum, rechtes Bild vertikale Führung und linkes Bild horizontale Führung.



3.12 Kostenoptimierung durch die erhöhte Vorfabrikation

Das Autorenteam konnte auf Grund der Erfahrung des Prototyps folgende Punkte für eine mögliche Kostenoptimierung ausmachen.

- Der Montageaufwand der Unterkonstruktion ist in der Werkstatt zeitlich wesentlich effizienter als auf der Baustelle, Voraussetzung ist eine gute Avorplanung.
- Eine gute Avorplanung bedeutete u.a: Präzis vermasste und mit allen notwendig Angaben erstellte Plangrundlagen spezifisch für jedes Wandelement (eine Art Anleitung für die Produktion), die Plangrundlagen sind von allen involvierten Akteuren freizugeben, Ablaufprozesse sind zu definieren; von der Bestellung bis zur Montage auf der Baustelle, Logistik zur Bereitstellung der Ressourcen «just in time» in der richtigen Menge und Stelle.
- Die erhöhte Massgenauigkeit innerhalb des vofabrizierten Rohbaus hat für alle nachfolgende Arbeitsgattungen einen positiven Effekt, welcher sich in terminlicher und finanzieller Hinsicht positiv auswirkt.
Dies sind z.B. witterungsgeschützter, sicherer und professionell eingerichteter Arbeitsplatz, gut strukturierter und geregelte Arbeitsabläufe, einfache Logistikprozesse (Materialien), kurze Arbeitswege, hohe Effizienz, usw.
- Die erhoffte Vereinfachung bzw. Teilverzicht bei der Absturzsicherung (Gerüstung) konnte bei der ausgeführten Prototypfassade nicht realisiert werden. Da die Anforderungen an die Absturzsicherheit nicht in allen Arbeitsprozessen jederzeit gewährleistet werden kann.
- Holzbaufirmen haben die Affinität, ein Thema als Schwerpunkt aufzunehmen und umzusetzen. Es ist eine Branche, welche sich seit Jahren mit dem Thema Vorfabrikation und Kostenoptimierung auseinandersetzt und es versteht Leistungen von anderen Branchen zu integrieren und als Gesamtprodukt auf dem Markt anzubieten.



4 Teilprojekt Ausblick für zukünftige mögliche Kostensenkungen

Im 3. Teil versuchen die Autoren einen Ausblick zu geben, wo sie zukünftige Kostensenkungen von BIPV-Systemen sehen. Dies sind Verbesserungen in den Prozessabläufen bei Planung und Umsetzung, sowie in den Weiterentwicklungen einzelner BIPV-Fassadenelemente.

Mit Ausnahme des 1. Punktes «Architektur des Gebäudes» erfolgt die nachfolgende Auflistung in Anlehnung an die erarbeitete Systematik für die Benchmark-Erfassung.

Die Prozentangabe ist in etwa der Anteil an die Gesamtkosten, siehe auch Kapitel 2.4.1, Abb. 8.

- Architektur des Gebäudes
- A. Planungsaufwand 11 %
- B. Fassadenbekleidung 26 %
- C. Aufhängesystem 5 %
- D. Unterkonstruktion 14 %
- H. Elektrische Installation 8 %

4.1 Architektur des Gebäudes

Einen entscheidenden Einfluss für eine kostengünstige Umsetzung einer BIPV-Fassade liegt bei der Architektur des Gebäudes.

Positiv beeinflusst werden die Kosten durch folgende Merkmale:

- Gebäude mit einem einfachen Volumenkörper, einfacher Abwicklung der Aussenhüllfläche
- Fensterflächen auf wenige Typen reduziert oder einheitliche, regelmässigen Fensterrasterung
- Keine oder volumetrisch klare Vor- und Anbauten, wie Erker, Balkone, Vordächer usw.
- Klare und regelmässige Rasterung in der Gebäudehülle
- Einheitliche Geschosshöhe, einheitliche Brüstungsbänder
- Einheitliche Aussenwandkonstruktion mit einfachen Befestigungsmöglichkeiten der Unterkonstruktion

Diese Eigenschaften weisen meistens Verwaltungs- und Industriebauten auf. Die Wohnbauten haben infolge ihrer Nutzungseigenschaft oft aufwendigere Abwicklungen in der Gebäudehülle mit Balkonen, und vielen, z.T. unterschiedlichen Fensterabmessungen.

Bei Neubauten sind die oben aufgeführten Merkmale in der Regel einfacher umzusetzen als Bauten im Bestand.

Anmerkung: Unser Baurecht nimmt z.T. leider oft grossen Einfluss auf die Architektur eines Gebäudes, auch bei Neubauprojekten. Das Hauptvolumen, resp. Aussenabmessungen werden meistens durch das Baurecht bestimmt. Dies war auch beim Ersatzneubau MFH Seewadelstrasse 9 in Affoltern am Albis der Fall. Die Grundfläche und die Gebäudehöhen konnten nur noch im Zentimeter-Bereich optimiert werden. Dadurch war eine optimierte Fassadenrasterung für eine möglichst geringe Anzahl von Modulmassen, erheblich eingeschränkt. Eine Optimierung wäre nur mit Einbussen in der Ausnutzung des Grundstückes einher gegangen, sprich kleinere Wohnungen oder Wegfall von Wohnungen.



4.2 Planungsaufwand (A)

Der Planungsprozess, wie er heute wahrgenommen wird:

- Der Austausch zwischen den Planenden ist z.T. zeitintensiv und aufwändig. Vor allem bei unerfahrenen PlanerInnen und IngenieurInnen, muss zuerst eine gemeinsame Sprache gefunden werden. Der ArchitektIn, bzw. die Architektur legt den Fokus auf die ästhetischen Aspekte. Die FachplanerInnen hingegen sehen vor allem die technische Herausforderung.
- Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes sind nur wenige Hilfestellungen in Form von Merkblättern zu Planung und Ausführung von BIPV-Fassaden vorhanden. Dadurch ist das Wissen über die technischen und ästhetischen Möglichkeiten oft nicht bekannt. Es sind keine übersichtlichen und themenübergreifenden Grundlagen vorhanden, welche als Nachschlagewerk oder Hilfsmittel für die Planenden zur Verfügung stehen. Die fehlenden Grundlagen und die Verunsicherung der einzelnen Akteure und Akteurinnen erfordern einen hohen Aufwand, um sich das Wissen anzueignen.
- Es fehlen einheitliche Anforderungen für aussagekräftige und einheitliche Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung ist ein wichtiges Kriterium in der Entscheidungsfindung.
- Meist ist keine geeignete Datenbasis für die verschiedenen Planungsaufgaben und -leistungen vorhanden. Sie werden jeweils immer wieder neu aufgebaut (z.B. Liste der PV-Fassadenmodule als Excelfile, Fassadenplaner baut seine Pläne wieder neu auf, etc.). Damit wird insbesondere das Änderungswesen sehr aufwändig und fehleranfällig. Es fehlen noch entsprechende digitale Werkzeuge (z.B. BIM Modelle, spezielle Planungswerkzeuge innerhalb des BIM-Prozesses).

Der Planungsprozesses, wie er verbessert werden kann:

- Für einen erfolgreichen und effizienten Planungsprozess ist es entscheidend, dass eine gebäudeintegrierte Photovoltaikanlage möglichst früh in die Planung einfließt. Das bedeutet, dass ein Vorentscheid möglichst früh "erzwungen" werden muss, in der SIA-Leistungsphase «Vorstudie / Vorprojekt». Es braucht effiziente und flexible Tools für Konzeptstudien mit Kosten-/ Nutzen-Abschätzungen und Visualisierungen, welche die Planenden unterstützen.
- Für die Umsetzung einer BIPV-Fassade ist das Zusammenspiel von Ästhetik, Technik und Wirtschaftlichkeit ein wichtiger Erfolgsfaktor für einen effiziente und effektiven Planungsprozess. Die einzelnen Akteure (Planenden, Behörden/Werke und Ausführende der einzelnen Arbeitsgattungen) müssen ihre Rolle und Funktion kennen und das Verständnis für die anderen Bereiche haben. Die Gesamtleitung führt und koordiniert das Team, damit eine effiziente und effektive Abwicklung möglich ist.
- Bei BIPV treffen Anforderungen aus zwei technisch sehr unterschiedlichen Bereichen aufeinander (PV/Elektrotechnik und Bautechnik). Damit würde heute jedes BIPV-Produkt/System eine spezifische normative Beschreibung und Zertifizierung benötigen, die insbesondere auf die zu kombinierenden Eigenschaften und normativen Lücken eingeht. Das ist sehr hinderlich im Planungs- und Installationsprozesses. Deshalb braucht es für die Klärung dieser Lücken und teilweise widersprüchlichen Anforderungen entsprechende Referenzstandards. Handbücher und Tutorials für Zertifizierungen, Installationsdetails könnten die Planungsaufgaben und die Installation vor Ort vereinfachen.
- Erarbeiten von neuen Tools, wie Grundlagen, «Stand der Technik»-Papier, Anforderungen in Normen oder Merkblättern definieren, Bereitstellen von Planungsmodulen usw., um die Planungsaktivitäten und die Installation vor Ort zu vereinfachen.

Hinweis: Die Erarbeitung des SIA-Merkblatt 2062 «Photovoltaik» hat im Frühling 2020 ihre Arbeit aufgenommen. Basler & Hofmann und Viridén + Partner AG haben die Sachbearbeitung übernommen.



- Die rechtlichen und administrativen Prozesse sollten vereinfacht werden, um die lange Warteliste für die Erteilung von Genehmigungen zu verringern.
- Mit dem Fortschritt im Digitalisierungsprozesse 'Bauen mit BIM' (Building Information Modeling) werden effizientere Planungsabläufe möglich. Z.B. mit Integration von Planungsinstrumente und -Module im Bereich von BIPV-Systemen. U.a. können mit spezifischeren Planungswerkzeugen auch für nicht standardisierte Situationen Hilfestellungen angeboten werden.

4.3 Bekleidung (B) - Photovoltaik-Module

Welches sind die Kostentreiber bei der Auswahl des PV-Moduls für ein BIPV-Systems:

- Grundsätzlich behindern fehlende (Semi-) Standards eine raschere Kostensenkung.
- Grösse der PV-Fassadenmodule: Grosse Modulflächen haben eine erhöhte statische Anforderung beim Glasaufbau zur Folge, entsprechend ist das Unterkonstruktionssystem auszulegen, Aufwändigere Logistik/Transport usw. sind die Folgen. Ideal sind Modulgrössen zwischen Schindeltafeln und Module entsprechend einer Brüstungshöhe.
- Vorschriften für Glas am Bau: Technisch gut etabliert sind heute Glas/Glas-PV-Fassadenmodule. Sie sind aber relativ schwer und erfordern häufig teure Unterkonstruktionen, ergeben hohe Transportkosten und schwierige und zeitaufwändige Installation. Für einige Marktsegmente (Nachrüstung, Leichtbaukonstruktionen usw.) sollten alternative Lösungen zur Gewichtsreduzierung mit unterschiedlichen PV- / Baustoffen (CIGS, Polymer usw.) oder unterschiedlichen Schichten der Verkleidung entwickelt werden.
- Ästhetik I: Die Verwendung von speziellen Frontgläsern, ohne standardisierter Qualität- und Produktionsprozess, erfordert spezifischen Anpassungen bei Zertifikat und Konformitätserklärung des Produkts. Es sind neue Qualitätsprüfungen, Modifikation der Produktionskette und -prozesse notwendig.
- Ästhetik II: Das gleiche gilt auch bei der Verwendung von speziellen Bedruckungstechniken, welche zusätzlich einen Einfluss auf Lieferkette, Abmessungen der Elemente, Logistik/Transport usw. haben.
- Fehlende (Semi-) Standards: Der Markt kann nur spielen, wenn keine speziellen Sonderwünsche, wie z.B. übergrosse Modulmasse gefordert werden.

Verbesserungspotential im Evaluationsprozess bei der Auswahl des PV-Moduls:

- Internationale Standards: Harmonisierung von internationalen Standards im PV-Bereich mit den lokalen Normen im Gebäudebereich. Hier sind heute viele Unklarheiten und Hindernisse vorhanden.
- Prozesszertifizierung: Es braucht prozessbasierte Leistungsgarantien für BIPV-Produkte, damit aufwändige Leistungstests im Nachgang vermieden werden und die Planungssicherheit gewährleistet ist.
- Standardisierung BIPV-Produkte: Standardisierung von Modulangeboten mit entsprechenden Datenblättern. Zudem muss in Zukunft die PV-Industrie flexible Masse in einem bestimmten Umfang kostengünstig und effizient anbieten können, analog zu Fensterbauern.
- Ästhetik: Prozessverbesserung der Farbauswahl der Module, damit der Planungsaufwand für Planende, Bauherrschaft und Unternehmende einfacher und effektiv vorgenommen werden kann und der Kunde nicht bis zur Lieferung im Ungewissen über das Ergebnis ist.
- Planungs-Tools: Den Planenden Tools zur Verfügung stellen, welche mehr Übersicht und Transparenz über die Angebote und Möglichkeiten der PV-Module bieten.



- Effizienter Datenabgleich: Möglichst frühe Abgabe von korrekten Energiedaten von Modulen aus Kleinserien und kundenspezifischen Produktionen. Dazu sind einheitliche Definitionen und Prüfprozesse für die Ermittlung von Energiedaten notwendig. Dies ist notwendig, damit Ertragsabschätzungen genauer und die Verstringung korrekt und effizient vorgenommen werden kann.

4.3.1 These zur Marktentwicklung der PV-Module für BIPV-Systeme

Bei BIPV-Systemen kommen meist folgende PV-Module zur Anwendung:

«Kundenspezifische Module»

- Produktangebot: Bietet eine hohe Flexibilität an Abmessungen, Glasstärken, Glasoberflächen und farblicher Gestaltung.
- Herkunft: Glasveredler mit Diversifikation in Richtung BIPV
- Produktion: Weitgehend manuelle Produktion bei Zellverbindungen und elektrischen Anschlüssen. Übergrosse Produktionsmittel

«Kleinserien»

- Produktangebot: Serielle PV-Module in einer limitierten Anzahl von Abmessungen, Glas-Glas Module als high-end Variante, farblichen Gestaltungsmöglichkeiten anhand definierter Standardfarben. Diverse Angebote im Bereich von integrierten PV-Anlage bei Steildächern auf dem Markt vorhanden.
- Herkunft: Klassische PV-Modulhersteller mit strategischer Differenzierung Richtung BIPV
- Produktion: Weitgehend automatisierte Produktion bei der Zellverbindung und elektrischen Anschlüssen. Effizienz-optimierte Produktionsmittel mit begrenzter Flexibilität.

Entwicklung der letzten Jahre und Situation heute:

BIPV Produkte sind nach wie vor eine Nische, die noch immer stark von sehr differenzierten architektonischen Ansprüchen geprägt sind. Entsprechend sind die wichtigen Anbieter noch mehrheitlich vom Typ «kundenspezifische Module».

Die grosse Verschiebung der Produktionsstätten von Standard PV-Modulen von den USA und Europa nach Asien in den letzten 10 Jahren hat aber eine Reihe von verbliebenen europäischen Modulhersteller veranlasst, sich strategisch in die Richtung BIPV zu verändern. Dies ist zum Teil als dynamische Entwicklung und zum Teil durch Übernahmen geschehen.

Noch wenig verändert hat sich der Charakter der Fassaden BIPV-Projekte. Nach wie vor dominieren die Leuchtturm- und Architektur-Projekte. Zudem ändern sich in der Regel auch immer wieder die Zusammensetzungen der Beteiligten. Durch die hohe Komplexität dieser Projekte braucht es jeweils eine kompetente zentrale Koordinationsstelle, was heute ein wesentlicher Engpass darstellt.

Trends und mögliche zukünftige Entwicklungen:

Beim Produktangebot, ein günstiges Marktumfeld vorausgesetzt, wird sich bei dem Typen «Kleinserien» Anbietern der Trend zu einem breiteren und differenzierteren, für die BIPV-Anwendung geeigneten Sortiment weiterentwickeln. Dabei werden sie um ein Angebot von Produkten, die gestalterisch (Farbe und Textur) flexibler sind, nicht herumkommen. Durch die zunehmende Konkurrenz in dieser Nische, werden Hersteller von «kundenspezifischen Modulen» gezwungen, ihre Kosten zu reduzieren, was nur mit Standardisierung und Automatisierung möglich ist.



An Stelle von fixen Abmessungen, wie wir sie aus der Bauwirtschaft für viele Produkte kennen (z.B. Backsteine, Fassadenplatten etc.) könnte sich für die BIPV eine transparente Darstellung und Nutzung von Metastandards vorteilhaft erweisen. Jeder Modulhersteller hat heute seine Prozessparameter definiert wie z.B. verwendete Zellgrößen, Abstände zwischen den Zellen und zu den Modul-Rändern, Randbereiche für die Verbinder, sowie minimale und maximale Modulabmessungen und weiteren "Design-Regeln".

Mit Unterstützung von speziellen Applikationen in seinem CAD müsste es einem Planer/Architekten möglich sein, bereits im Entwurfsprozess mit diesen Daten flexibel und doch präzise und effizient die gewünschten Produkte zu planen. Diese Daten können direkt für Angebot, Bestellung und Produktion genutzt werden.

In diesem Spiel des Wettbewerbs kann erwartet werden, dass sich Quasi-Standards bei Abmessungen und Modulaufbau sowie bei den gestalterischen Lösungen herausbilden. Damit verbunden wird sich der bekannte Trend der sinkenden Preise bei der Photovoltaik auch in den Bereich der BIPV Produkte fortsetzen.

Bei den Anbietern könnten sich die Wertschöpfungsketten zu Gunsten von Spezialisten eher wieder verkürzen. Z.B. ist es denkbar, dass Glasdruckspezialisten eigenständig am Markt auftreten, um ihre ebenso bereits standardisierten Produkte zu präsentieren. Das wird auch Raum für neue Anbieter mit neuen Geschäftsmodellen und stark fokussierten Leistungen geben.

Die BIPV-Technologie sollte für das spezifische Gebäudehüllensystem und die Gebäudetypologie optimiert werden. Jede Lösung muss die spezifischen Standards erfüllen, die für die statische Berechnung, den Brandschutz, den thermischen und akustischen Schutz usw. festgelegt wurden.

Gut etablierte Glas-Glas-PV-Fassadenmodule sind heutzutage zuverlässig, aber zu schwer und erfordern häufig teure Unterkonstruktionen, erzeugen hohe Transportkosten, schwierige und zeitaufwändige Installation. Für einige Marktsegmente (Nachrüstung, Leichtbaukonstruktionen usw.) sollten alternative Lösungen zur Gewichtsreduzierung mit unterschiedlichen PV-/ Baustoffen (CIGS, Polymer usw.) oder unterschiedlichen Schichten der Verkleidung entwickelt werden.

4.4 Aufhängesystem (C) / Unterkonstruktion (D)

Faktoren für günstigere Aufhänge- bzw. Unterkonstruktionssysteme:

- Vereinfachungen: Standardisierungen innerhalb des Systems helfen die Kosten zu optimieren. Vorausgesetzt, die Flexibilität des Systems bleibt für die unterschiedlichsten Modulabmessungen, Formate usw. erhalten.
- Systemteile: Reduktion der Konstruktionsteile und des Materialeinsatzes (Gewicht, Masse), hoher Anteil an Normteilen anstreben, Umsetzen von Plug-and-Play Konzepte mit eventuell mehr Vorfertigung durch den Systemanbieter.
Der Grundsatz gilt, industrielle Prozesse sind meistens kostengünstiger als Prozesse vor Ort / Baustelle.
- Bautoleranzen: Hohe Flexibilität zur Aufnahme von Bautoleranzen: Produktkonzepte (z. B. Rückmontagekonzept, mit denen die Konstruktionstoleranz ausgeglichen werden kann) könnten die Installationszeit und die Kosten beschleunigen und den BIPV-Prozess vereinfachen.
- Installationszeit: Montagesysteme oder vormontierte Produkte, die weniger Zeit für die Installation benötigen und weniger erfahrene Verarbeitung erfordern.
- Vereinfachung der Logistik/Transport: Montage Aufhängesystem direkt am Produktionsort der Module.
Ein anderer Ansatz ist die Prüfung, ob Montage eines Aufhängesystems auf die Module (Backrail-Montage) direkt auf der Baustelle möglich ist und im Idealfall direkt vom Fassadenbauer übernommen werden kann.



- Digitalisierung der Logistik: Grundsätzlich erspart eine gute und effiziente Logistik viele Leerläufe und Zeit. Ein Ansatz ist, den einzelnen Modulen von Anfang mit einer definierten Codierung auszurüsten (z.B. QR-Code), welche über den gesamten Ablaufprozess die entsprechende Information (wie Spezifikation, Angabe zum Aufhängesystem, Etappierung, Ort der Platzierung in der Fassade usw.) enthält.
- Systemwahl: «One-size-fits-all» ist eher schwierig und z.T. ineffizient bei grösseren Projekten. Die Einsatzgrenzen eines Systems sind klar zu definieren und zu kommunizieren. Am falschen Ort eingesetzte Systeme verteuern die Montageleistung erheblich.

4.5 Elektrische Installation (H)

Faktoren für günstigere elektrische Installation:

- Optimierte Versträngung: Für eine wirtschaftlich gut funktionierende Anlage ist ein optimiertes und abgestimmtes Versträngungskonzept entscheidend. Die Planungstools müssen in Zukunft diese Optimierung auf der Basis der PV-Moduldaten und Strahlungssimulationen am Gebäude vornehmen können.

Neue Ansätze:

- Für eine Kostenreduktion bei der elektrischen Installation ist die Entwicklung von neuen einfacheren Verschaltungs- und Stecksysteme zu prüfen. Damit eine schnellere, einfachere und sichere Montage der Installationen möglich wird.
- Wie ist eine Optimierung und Automatisierung einer Versträngung möglich? Kann ein Stringplan mit geeigneten Algorithmen automatisiert werden? Damit würde es ausreichen, wenn die Moduldaten bei Auslieferung ab Hersteller definitiv bekannt sind. Mit einem entsprechenden Tool könnte vorgängig auch Sensitivitätsanalyse innerhalb der Produktionstoleranzen durchgeführt werden, wodurch kritische Faktoren der Leitungsführung innerhalb der Fassade früh transparent gemacht werden könnten.)
- In diesem Zusammenhang ist auch die Anschlussbox (bei den Modulen) zu optimieren: einfachere, flexiblere Steckverbindung, Reduktion von unnötigen Kabellängen («Kabelsalat»).



5 Schlussfolgerungen und Fazit

Im Teilprojekt «Kostenvergleich BIPV-Fassade»

Die in dieser Studie bereitgestellte Methode ist auf andere Fallstudien replizierbar und skalierbar und ermöglicht die Bewertung der Kostenaufteilung für jede Art von Gebäude. BIPV-Fassadenlösungen sind heute in der Schweiz noch selten. Wie so oft im Rahmen von experimentellen Projekten können die wirtschaftlichen Aspekte nicht der Haupttreiber sein, der bestimmte Projekte auslöst. Aus diesem Grund konnten in dieser Analyse keine klare Lernkurve oder Kostentrend definiert werden. Dennoch sind die Bemühungen verschiedener Stakeholder sichtbar, die Kosten zu senken, die Technologie zu entwickeln und den Prozess zu optimieren. Die Politik, das Sozialverhalten und das wachsende Bewusstsein für den Einsatz umweltfreundlicher Technologien erhöhen das Interesse an BIPV-Systemen.

Im Teilprojekt «Prototyp für hohen Vorfertigungsgrad»

Für eine Erhöhung eines hohen Vorfertigungsgrad sind seitens Holzbaufirmen und Unterkonstruktionslieferanten Optimierungen notwendig, damit nachträgliche Justierungen mit einfachen Handgriffen möglich sind. Das Interesse für solche Optimierung ist von Seite Unterkonstruktion-Systemanbietern vorhanden. Da die Nachfrage aktuell noch eher gering ist, finden Optimierung nur in kleinen Schritten und zeitlich langsam statt. Die Nachfrage ist gegeben, sobald grössere Holzbaufirmen den Fokus der Vorfabrikation auch bei der Gebäudehülle erkennen und ein entsprechendes Umsetzungsvolumen vorhanden ist.

Im Teilprojekt «Ausblick für zukünftige möglich Kostensenkungen»

Mit einer Standardisierung der BIPV Produkte, dem damit wachsenden Vertrauen im Markt und den tieferen Preisen werden sich vermehrt Investoren und Bauherren mit Ihren Beratern/Architekten/Fachplanern an das Thema und die Umsetzung heranwagen. Dabei werden sich parallel zu den Produkten auch die Schnittstellen standardisieren und der Koordinationsaufwand sinken. BIPV Fassadenanwendungen werden "mainstream".

6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die erarbeitete Kostensystematik ermöglicht es, eine detaillierte Kostenübersicht und Datenbank für jedes Element der BIPV-Fassade zu erstellen und die Details der Endnutzerkosten von Solarfassaden aus realen Daten zu ermitteln. Mit dieser Analyse war es zum ersten Mal möglich, jedes Kostenelements für den gesamten Bauprozess einer BIPV-Fassade zu bewerten. Welche wiederum als Grundlagen für die Optimierung einer Kostensenkung dienen.

Von Seite der SUPSI und Viridén + Partner besteht ein grosses Interesse, weitere in der Schweiz realisierte Projekte mit BIPV-Fassaden zu erfassen und auszuwerten.

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Es wird ein grosser Austausch mit vielen Exponenten der Schweizer „PV-Szene“ gepflegt.

In diesem Zusammenhang wurden je rund 50 Personen zu einem Event am 28. Mai 2018 und 23. Mai 2019 nach Schlieren eingeladen, an dem schliesslich je 40 Personen teilnahmen. Im Jahr 2020 musste der Anlass infolge von Covid-19 aufs Jahr 2021 verschoben werden.



Am 11. September 2019 lud Ernst Schweizer AG, Viridén + Partner AG und Alfred Müller zu einem Fachanlass über das Plusenergiehaus mit PV-Fassade MFH Seewadelstrasse 9 Affoltern am Albis ein; Das Zielpublikum waren Architekten, Bauinvestoren, Baugenossenschaften; primär aus dem Einzugsgebiet Zürich und Knonaueramt; Anzahl Personen rund 50.

SUPSI, Ernst Schweizer AG und Viridén + Partner AG sind Projektpartner beim Projekt BIPVBOOST im Rahmen des EU-Programms Horizon 2020 (Dauer 1.Okt. 2018 bis 30.Sept. 2022).

Präsentation der erarbeiteten Kostensystematik und 1. Auswertung beim 21. Status-Seminar am 3. Und 4. September 2020, Organisation Brenet.

The cost-breakdown method here developed will be used within different national and international project to develop economic analysis at different levels including:

- BIPV Status Report 2020 (SUPSI, Becquerel Institute; 2020)
- (PV) Verso-EST (SUPSI; 2019-2021)
- Weitere Bundesprojekte, welche am Laufen sind.

8 Publikationen

Swissbau 2020, Solar-fassaden zwischen Ästhetik und Kostendruck, BRENET Symposium, Basel.

Method for the cost evaluation of BIPV facades and multilevel cost analysis of the solar envelope of six Swiss case studies, P. Corti, A. Büsser, P. Bonomo, K. Viridén, F. Frontini, 2020.

Präsentation der erarbeiteten Kostensystematik und 1. Auswertung beim 21. Status-Seminar am 3. Und 4. September 2020, Organisation Brenet.

9 Literaturverzeichnis

für Kapitel 2:

Collection of building typologies and identification of possibilities with optimal market share, BIPVBOOST, 2019

Overcoming barriers for the BIPV diffusion at urban and building scale, Paolo Corti, Pierluigi Bonomo, Isa Zanetti, Cristina S. Polo, Francesco Frontini, 2018

10 Referenzen

[1] Update on BIPV market and stakeholder analysis, BIPVBOOST, 2019

[2] Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fraunhofer ISE, Download von www.pv-fakten.de, Fassung vom 10.06.2020

[3] US Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, NREL

© sämtlicher Fotos sind bei Viridén + Partner AG / Ernst Schweizer AG

© der Grafiken und Tabellen sind bei SUPSI / Viridén + Partner AG



11 Anhang

[A] Technische Datenblätter der einzelnen Objekten der Fallstudie