

Abschlussbericht

DBU Studie Az. 37732/01-24/2

3DSunTrack

„Studie zur Entwicklung von dreidimensional verformbaren Faserverbunden mit dem Anwendungsziel eines nachgeführten Solarmoduls“

Laufzeit der Studie 28.09.2021 – 30.03.2023
(27.09.2022)

Herausgebende Bewilligungsempfänger

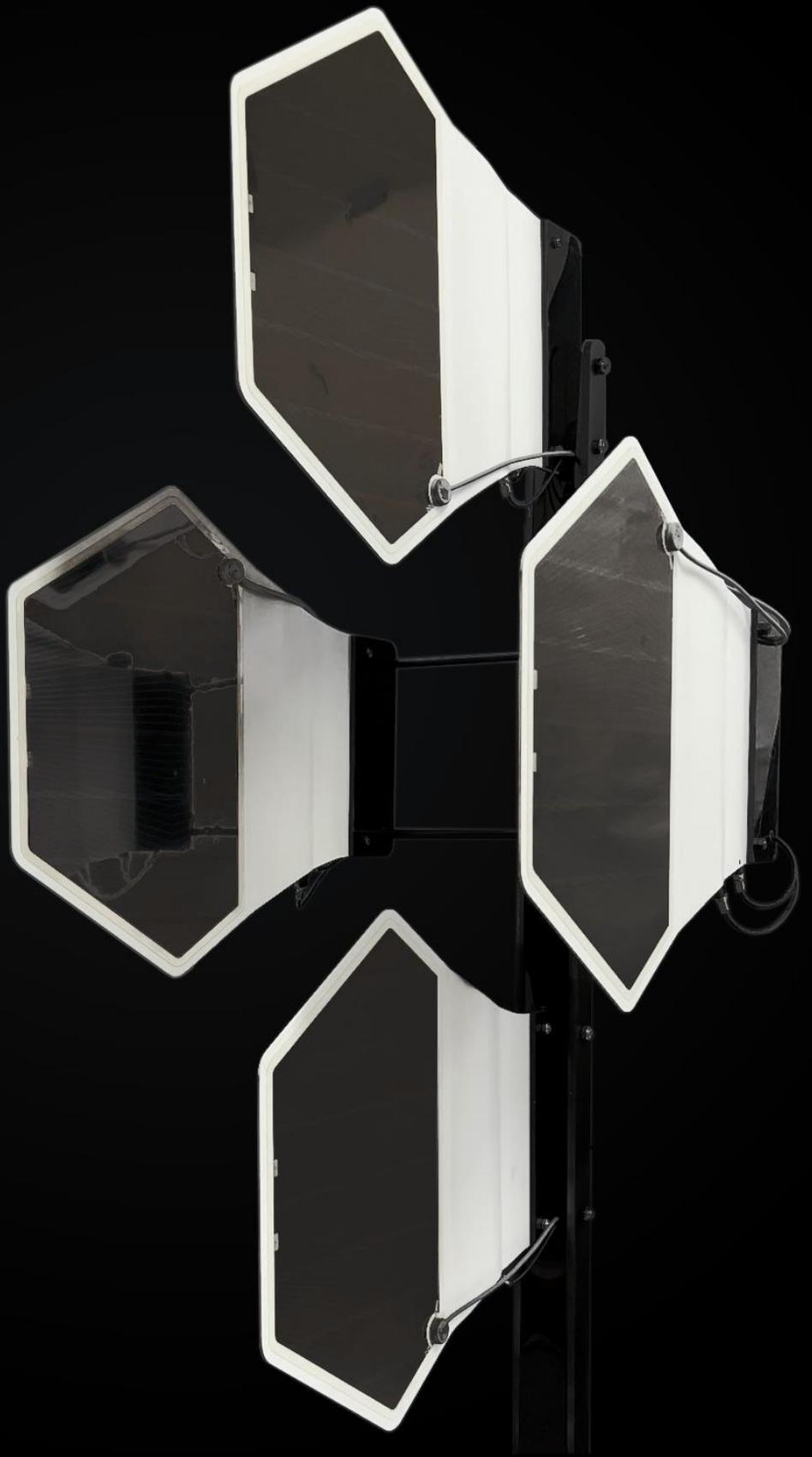
Forschungsstelle 1: Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) Denkendorf

Forschungsstelle 2: Institut für Textil- und Fasertechnologien (ITFT), Universität Stuttgart

Forschungsstelle 3: Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE),
Universität Stuttgart

Larissa Born, Edith Anahi Gonzalez, Patrick Kaiser, Axel Körner, Markus Milwich,
Götz T. Gresser, Jan Knippers

Stuttgart, 31.07.2023



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Bilder-/Tabellenverzeichnis	2
Formelverzeichnis	3
Nomenklatur	4
1 Zusammenfassung	5
2 Einleitung	6
2.1 Stand der Technik.....	6
2.1.1 Solarmodule und Nachführung.....	6
2.1.2 Nachgiebige Mechanismen / Fassadenverschattungen aus FVK.....	7
2.2 Zielsetzung.....	7
2.3 Aufgabenstellung.....	8
2.3.1 Solarnachführung.....	8
2.3.2 Aktuator.....	8
2.3.3 Faserverbund.....	9
2.3.4 Demonstrator.....	9
3 Durchgeführte Forschungsarbeiten und Forschungsergebnisse	10
3.1 Solare Nachführung.....	11
3.2 Aktuator.....	13
3.3 Faserverbund.....	14
3.4 Demonstrator.....	19
4 Fazit	24
Literaturverzeichnis	26

Bilder-/Tabellenverzeichnis

Abbildung 1	Einordnung der Arbeiten innerhalb der Studie „3DSunTrack“ in die Forschung zu adaptiven FVK/Fassaden an den beteiligten Instituten.....	7
Abbildung 2	Arbeitsfelder in der Studie „3DSunTrack“.....	8
Abbildung 3	Arbeitspakete und Meilensteinplanung in der Studie „3DSunTrack“.....	9
Abbildung 4	Fassadenabdeckung bei nicht aktuierten, adaptiven Solarmodulen (oben) und bei maximaler Aktuierung nach rechts (Mitte) oder links (unten).	10
Abbildung 5	Analysierte Städte in verschiedenen Breitengraden.	11
Abbildung 6	Einfallende Sonnenstrahlung auf horizontale Flächen, vertikale Flächen mit unterschiedlicher Ausrichtung (statische Module) und mit zwei Arten der Sonnennachführung (1-achsig und 2-achsig).	12
Abbildung 7	Prinzip der Verformung durch integrierte pneumatische Aktuierung in Form eines Kissens.....	13
Abbildung 8	Laminataufbauten aktuierbarer FVK aus ET222*, HHZ82 und TPU (Querschnitt)...	14
Abbildung 9	Vergleich der Verformung (per Hand ohne Kissen in Kissenkammer) des Laminats bei der Integration von A einer Kissenkammer und B zwei Kissenkammern.....	15
Abbildung 10	Lagenaufbau mit vier Lagen ET222 (Faserorientierung $\pm 45^\circ$) in der Laminatmitte und beispielhaft eingezeichneter Überlappungsbreite der integrierten Teflonstreifen.	15
Abbildung 11	Haupteffekte auf den notwendigen Aktuierungs-Luftdruck.	16
Abbildung 12	Abhängigkeit zwischen verschiedenen Überlappungsbreiten der zwei Kissen notwendigen Luftdruck zur Aktuierung für einen Biegewinkel von 75° (4 Lagen ET222 in der Laminatmitte).	16
Abbildung 13	Haupteffekte auf den messbaren realen Winkel.	18
Abbildung 14	Rendering des „3DSunTrack“-Demonstrators.....	19
Abbildung 15	Draufsicht auf ein Modul des Demonstrators.....	20
Abbildung 16	Diagramm der Kissengeometrie und -platzierung mit Kennzeichnung des Überlappungsbereiches sowie Darstellung der resultierenden Bewegung.	20
Abbildung 17	Diagramm zur Nachführungslogik.	21
Abbildung 18	Elektronische Schaltpläne für das Ortungssystem der Solarnachführung.	22
Abbildung 19	Erste Tests mit adaptiven PV-Panels innerhalb der Studie „3DSunTrack“.....	22
Abbildung 20	Module des „3DSunTrack“-Demonstrators in verschiedenen Aktuierungszuständen.	23
Abbildung 21	Anordnung der Module mit verschiedenen Ausrichtungen in Bezug zu den Sonnenwinkeln.	24

Formelverzeichnis

- (3.1) Regressionsfunktion für pneumatischen Druck abh. von Breite der Kissenüberlappung 17
- (3.2) Bestimmung der Nullstelle/Extremstelle/des Minimums für den pneumatischen Druck in Abhängigkeit von der Überlappungsbreite der Kissen 17
- (3.3) Lineare Regressionsfunktion für pneumatischen Druck abh. von Anzahl Lagen ET222 17
- (3.4) Regressionsfunktion für realen Biegewinkel abh. von Zielwinkel und Anzahl Lagen ET222 18

Nomenklatur

BIPV.....	bauwerkintegrierte Photovoltaik
DITF.....	Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung, Denkendorf
EVA.....	Ethylvinylacetat
FVK.....	Faserverbundkunststoffe
GFK.....	glasfaserverstärkter Kunststoff
ITFT	Institut für Textil- und Fasertechnologien
itke.....	Institut für Tragwerkskonstruktionen und konstruktives Entwerfen
PV	Photovoltaik
TDS	Technical Data Sheet
TPU	Thermoplastisches Elastomer auf Urethanbasis
ZIM.....	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand

1 Zusammenfassung

Ziel der Studie „3DSunTrack“ ist die Möglichkeiten der dreidimensionalen Verformung von Faserverbundkunststoffen (FVK) basierend auf nachgiebigen Mechanismen zu untersuchen. Gleichzeitig sollen durch solare Nachführung von Photovoltaik (PV) Möglichkeiten für eine höhere Energieausbeute bzw. neue Ideen für die Optimierung der Energiegewinnung aufgezeigt werden. Ursprüngliches Ziel der Studie war die Entwicklung eines nachführbaren, freistehenden Solarmoduls mittels FVK-Gelenken. Nach Rücksprache mit der Industrie während der Studie, wurde dieses Ziel neu definiert, da für die Industrie aufgrund hoher zusätzlicher Kosten und einem als gering eingeschätzten Mehrwert dieses Ziel nicht attraktiv sei. Stattdessen wurde aufbauend auf bisherigen Forschungsergebnissen die Funktionalisierung von Fassadenelementen mittels Photovoltaik untersucht. Dieses Anwendungsfeld würde einen neuen Markt eröffnen und sei somit attraktiver für potentielle Industriepartner, da es sich um eine Nutzungserweiterung handelt.

In der 1,5-jährigen Studie konnte gezeigt werden, dass sich Faserverbundkunststoffe für die technische Umsetzung von nachgiebigen Mechanismen mit dem Potenzial für dreidimensionale Verformung eignen. Innerhalb von Versuchsreihen, bei denen unterschiedliche Materialaufbauten und Anordnung der Aktuatoren realisiert und der Biegewinkel bei zweidimensionaler Verformung gemessen wurde, konnte bewiesen werden, dass sich durch genannte Faktoren der Verbrauch des pneumatischen Luftdrucks reduzieren und somit die Energieeffizienz adaptiver FVK-Systeme steigern lässt.

Durch Simulationen konnte in der Studie darüber hinaus gezeigt werden, dass eine 1-achsige bzw. 2-achsige Nachführung von Solarmodulen an einer Fassade zu einer erheblichen Steigerung der Ausbeute solarer Energie führen. Im Kontext der Oberflächenfunktionalisierung mit Photovoltaik konnte überdies eine Firma gefunden werden (ASCA GmbH), die die Möglichkeit hat endkonturnahe Photovoltaikfolien für eine vollflächige Funktionalisierung adaptiver Fassadenmodule herzustellen.

Auf Basis dieser Studien und Ergebnisse wurde die Studie mit der Herstellung eines Demonstrators abgeschlossen, der die 1-achsige Nachführung (zweite Achse in Stufen einstellbar) der adaptiven – beidseitig mit Photovoltaik funktionalisierten – Fassadenverschattungselemente erlaubt. Er ist Ausgangsbasis für weiterführende, tiefgehende Untersuchungen (erste Untersuchungen wurden bereits innerhalb der Laufzeit der Studie durchgeführt), die zum Ziel haben die Simulationsmodelle, die innerhalb der Studie erzielt werden konnten, zu beweisen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen den gesellschaftlichen Mehrwert des Technologieansatzes, jedoch muss das Ergebnis in die industrielle Anwendung übertragen werden. Hierfür gilt es Industriepartner zu gewinnen, die die verschiedenen Aspekte der Entwicklungsarbeit abdecken. Gleichzeitig gilt es in aufbauender Forschungsarbeit die Ergebnisse weiter zu verifizieren und zu vertiefen. Attraktives Ziel wäre beispielsweise ein Tool über das sich Fassaden künftig mit/ohne Photovoltaik für verschiedene Klimazonen und mit entsprechend unterschiedlichen Bewegungsabläufen abbilden lassen, dass auch das energetische Potenzial einer Fassadenbeschattung beziffert werden kann. In diesem Zusammenhang sollten auch weitere Materialien einer Datenbank, die an die Simulation gekoppelt ist, zugeführt werden.

Die Arbeiten innerhalb der Studie „3DSunTrack“ wurden durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Förderkennzeichen 37732/01-24/2 gefördert. Der Abschlussbericht kann über die drei herausgebenden Forschungsstellen [Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung ([DITF](#)) Denkendorf; Institut für Textil- und Fasertechnologien ([ITFT](#)) der Universität Stuttgart; Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen ([ITKE](#)) der Universität Stuttgart] bezogen werden.

2 Einleitung

Die Fassade verbindet den Innenraum eines Gebäudes mit der äußeren Umgebung eines Gebäudes und spielt daher generell eine wichtige Rolle bei der Gebäudegestaltung, aber auch in Bezug auf den Licht- und Energieeintrag durch die Fassade und somit bei der Schaffung energieneutraler Gebäude [12]. Moderne Fassaden sollten in der Lage sein, sich an die ständigen Veränderungen der Umgebungsbedingungen anzupassen, um den gewünschten Komfort zu erreichen, ohne dass ein erheblicher Energieaufwand dafür erforderlich ist [1]. Stufenlos einstellbare, adaptive Fassaden können nicht nur die Gebäudeleistung durch Senkung des Energieverbrauchs verbessern, sondern haben auch das Potenzial bspw. durch Oberflächenfunktionalisierung, erneuerbare Energien bereitzustellen, die gespeichert und im Gebäude genutzt werden können [16].

Adaptive Verschattungen, die die einfallende Sonnenstrahlung regulieren, gehören zu den am häufigsten verwendeten und erforschten Arten adaptiver Fassaden [7]. Andererseits ist die gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV) eine beliebte Lösung für die Erzeugung erneuerbarer Energien, da sie eine kostengünstige Energiequelle darstellen kann. Diese beiden sich ergänzenden Ansätze haben das Potenzial, eine integrative Lösung für die Gestaltung nachhaltiger Gebäude zu werden, die sowohl den Komfort als auch die Energieeffizienz optimiert.

2.1 Stand der Technik

2.1.1 Solarmodule und Nachführung

Die aufwendig betriebene Forschung bezüglich der Effizienzsteigerung von Solarzellen hat in der breiten, kostengetriebenen Anwendung bisher keinen entscheidenden Leistungszugewinn erbracht. Gängige Photovoltaikmodule auf Dächern oder in Solarparks besitzen einen Wirkungsgrad von nur ca. 25 % [4]. Wesentlich höhere Energieausbeuten können mit einer Nachführung von Solaranlagen entsprechend dem Sonnenstand erzielt werden: In freistehenden Solartürmen [19] können zwischen 30 % (1-achsige Nachführung) und 46 % (2-achsige Nachführung) höhere Erträge erzielt werden. An Tagen mit stark wechselnder Bewölkung kann eine sensorgesteuerte Nachführung bis zu 70 % Mehrertrag einfahren [18]. Trotz relativ einfachem Aufbau ist die Störanfälligkeit einer solchen Anlage, aufgrund der bewegten Teile, hoch, so dass kostenintensive Wartungen notwendig sind. Diese Kosten sind – trotz des Mehrertrags 2-achsiger Systeme von bis zu 46 % – als kritisch zu betrachten, und behindern wesentlich die Marktakzeptanz und breite Markteinführung. Finanziell sind nachgeführte Solarmodule, die auf Gebäuden installiert sind, besonders interessant, weil diese einen Anspruch auf höhere Einspeisevergütung für Dachanlagen haben.

BIPV sind eine zuverlässige Methode zur Deckung des Energiebedarfs eines Gebäudes [15]. Im Bereich der BIPV eröffnet die Dünnschicht-Photovoltaik, aufgrund ihrer Eigenschaften, neue Möglichkeiten. Sie wurden bereits auf verglasten Fassaden eingesetzt, um halbtransparente BIPV-Systeme zu schaffen [5]. Die Integration in adaptive Gebäudehüllen ist ein weiteres Anwendungsgebiet, welches Potenzial bietet. Ein aktuelles Projekt, das die Vorteile dieses Ansatzes untersucht hat, ist die an der ETH entwickelte „Adaptive Solar Façade“. Diese besteht aus Modulen mit Dünnschicht-Photovoltaik, die an einer steifen Unterkonstruktion befestigt sind und durch einen weichen pneumatischen Aktor in zwei Achsen bewegt wird [8]. Dieses Projekt zeigt das Potenzial der Nutzung adaptiver Fassaden als effiziente Quelle für die Solarenergie.

2.1.2 Nachgiebige Mechanismen / Fassadenverschattungen aus FVK

Technische Bewegungsapparate basieren meist auf Starrkörpermechanismen bei denen starre Glieder durch Gelenke miteinander verbunden sind. Die dafür verwendeten Gelenke sind anfällig gegenüber Reibung durch bspw. Stäube und stellen somit, insbesondere in komplexen Systemen, eine Schwachstelle dar. In der Biologie werden, im Gegensatz dazu, nachgiebige Mechanismen zur Übertragung einer Eingangsbewegung in eine Ausgangsbewegung genutzt. Zu den Vorteilen von nachgiebigen Mechanismen gehören die Reduktion der Teilezahl, die Spiel-, Verschleiß- und Reibungsfreiheit, der reduzierte Wartungsaufwand, die hohe Präzision, ein günstigeres Verhältnis zwischen Belastbarkeit und Masse, eine geringe Schmutzempfindlichkeit und eine erhöhte Sauberkeit während des Betriebs [6].

Die Arbeit der beteiligten Institute zur Übertragung des biologischen Ansatzes in ein technisches Material und Bauteil ist die Ausgangsbasis der Forschungsarbeit in der Studie „3DSunTrack“. Diverse Demonstratoren (vgl. Abbildung 1) zeigen die generelle Machbarkeit, wie beispielsweise Flectofin®, dessen Bewegungsprinzip von der Paradiesvogelblume (*Strelitzia reginae*) inspiriert wurde [11], Flectofold (Unterwasserrad *Aldrovanda vesiculosa*) [9], Flexafold (Streifenwanze *Graphosoma lineatum italicum* und Käfer *Dorcus titanus platymelus*) [13], sowie dem ITECH Research Demonstrator 2018-19 [10]. Aktuellstes Demonstrator-Projekt, aus dem Synergieeffekte für die Studie „3DSunTrack“ abgeleitet werden können, ist die Fassade im Botanischen Garten in Freiburg, die mit FlectoLine-Elementen ausgestattet wird. Im Gegensatz zu bisherigen Forschungsarbeiten fokussiert die Studie „3DSunTrack“ auf die Implementierung von Photovoltaik in die Oberfläche des FVK und die dreidimensionale Nachführung von Fassadenverschattungselementen¹.



Abbildung 1 Einordnung der Arbeiten innerhalb der Studie „3DSunTrack“ in die Forschung zu adaptiven FVK/Fassaden an den beteiligten Instituten.

2.2 Zielsetzung

Ziel der beantragten Studie ist die Entwicklung neuer Materialsysteme und Bewegungsmechanismen für dreidimensionale Bewegungsapparate von nachgeführten Solarpanels durch interdisziplinäre Forschung von Bauingenieuren, Architekten und Materialwissenschaftlern. Im Allgemeinen sind in beweglichen technischen Systemen Antrieb und Lagerung getrennte Funktionen. Die dabei verwendeten Scharniere und Kugellagerhalterungen sind störanfällig und wartungsintensiv. Innerhalb der Studie soll

¹ Lt. Antrag für die Studie war die Nachführung von bodennahen Solarmodulen angedacht. Das Gespräch mit potentiellen Industriepartnern zeigte im Verlauf der Studie, dass diese Produktidee, aufgrund von Kosten-Nutzen-Rechnungen, auf wenig positive Resonanz stößt. Eine Funktionalisierung von Fassaden bzw. bisher nicht oder schwer nutzbaren Flächen wurde dagegen empfohlen.

gezeigt und bewiesen werden, dass mit faserbasierten Materialsystemen und pneumatischen Aktuatoren Bewegungsapparate für dreidimensionale Verformungen abgebildet werden können. Durch den Einsatz pneumatischer Aktuatoren wäre die Position der Elemente in Relation zur Sonneneinstrahlung stufenlos regelbar, so dass die Energieausbeute maximiert werden kann. Gleichzeitig besticht der Ansatz durch geringere Betriebs- und Wartungskosten im Vergleich zu herkömmlichen Systemen. Die Studie soll das Potenzial faserbasierter Materialsysteme für die Umsetzung von Bewegungsapparaten zeigen und Basis für weitere Projekte in diesem Bereich sein, die das Ziel verfolgen den Ausbau der Solartechnik in Deutschland zur Erreichung der Klimaziele zu beschleunigen.

2.3 Aufgabenstellung

Basierend auf dem beschriebenen Ziel der Studie, ergeben sich vier Aufgabenfelder an denen die drei beteiligten Forschungseinrichtungen gemeinsam arbeiten. Die Aufgabenfelder sind in Abbildung 2 visualisiert. Basis für das Arbeitsfeld „Demonstrator“ sind die Ergebnisse aus den anderen drei Arbeitsfeldern: „Solarnachführung“, „Aktuator“ und „Faserverbund“. Die Aufgaben in den jeweiligen Arbeitsfeldern werden im Folgenden näher erläutert.

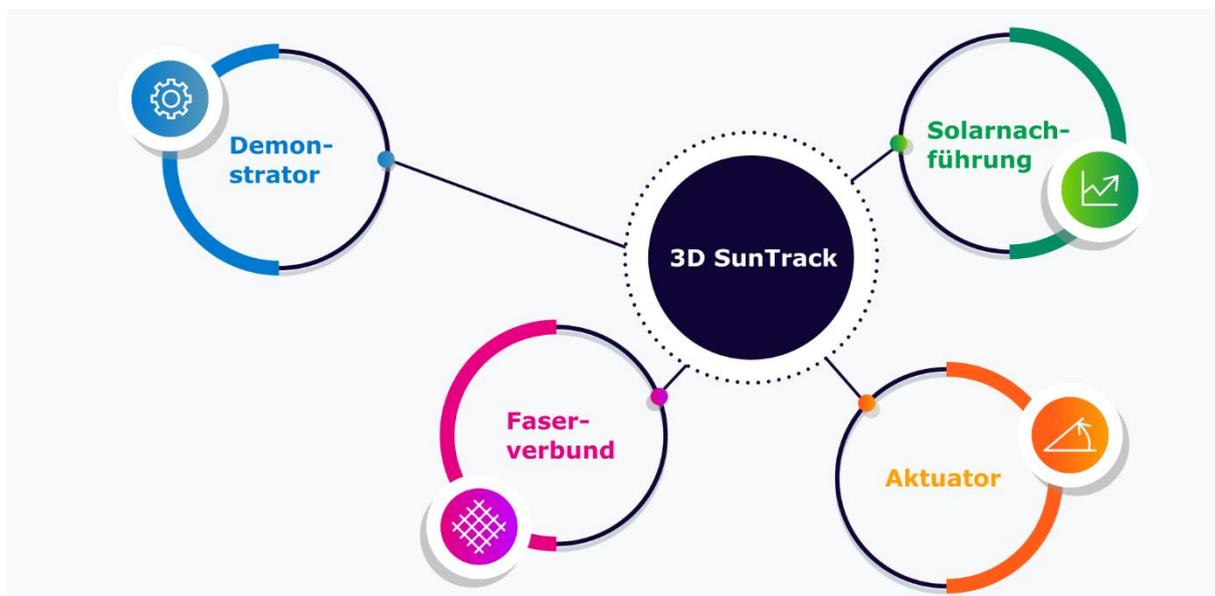


Abbildung 2 Arbeitsfelder in der Studie „3DSunTrack“.

2.3.1 Solarnachführung

Die Studie stellt die Hypothese auf, dass die Energieausbeute von Solaranlagen durch eine dreidimensionale Nachführung der Panels deutlich gesteigert werden kann. Basierend auf dieser Hypothese sollen Simulationen durchgeführt und Rücksprache mit Herstellern von Solaranlagen gehalten werden, um die Marktrelevanz zu eruieren. Die in der Studie durchgeführten Simulationen sollen darüber hinaus anhand des „3DSunTrack“-Demonstrators bewiesen werden.

2.3.2 Aktuator

Zur Bewegungssteuerung ist innerhalb der Studie ein pneumatischer Aktuator in Form eines mit Druckluft beaufschlagbaren Kissens vorgesehen. Abhängig von der Bauteilgeometrie und der erforderlichen Bewegung, wird das Kissen geplant und technisch umgesetzt. Für die technische Umsetzung wird auf ein Materialkonzept aus vorangegangenen Projekten zurückgegriffen. Es handelt sich um ein einseitig TPU-beschichtetes Polyestergewebe, dass durch die TPU-Beschichtung in der notwendigen Geometrie geschweißt werden kann.

2.3.3 Faserverbund

Am ITFT wurden bereits verschiedene Materialkombinationen für die technische Umsetzung von lokal nachgiebigen FVK entwickelt. Innerhalb dieser Studie soll eine Materialrecherche durchgeführt werden, um potentielle Entwicklungs- und Verbesserungspotenziale aufzudecken. Grundsätzlich geeignete Materialien werden in der Studie auf ihre Verformungseigenschaften geprüft und kleinere Funktionsdemonstratoren in Vorarbeit zum „3DSunTrack“-Demonstrator hergestellt.

2.3.4 Demonstrator

Die Forschungspartner haben das Ziel zum Abschluss der Studie einen Demonstrator technisch umzusetzen. Mit diesem soll das Potenzial von nachgiebigen Mechanismen basierend auf faserverstärkten Kunststoffen für die Bewegungsübertragung aufgezeigt werden. Am Beispiel der Photovoltaik soll gezeigt werden, dass sich solche Bauteile funktionalisieren lassen und durch die stufenlose Regelbarkeit ein Mehrwert für die technische Anwendung generiert werden kann.

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung liegt der Studie folgender Arbeitsplan zugrunde:

		Projektmonat											
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
AP1 DITF	1.1 Werkstoffe und Gesamtkonzept		M1										
	1.2 Werkstoffselektion und Sensorik					M2							
	1.3 "Arretierungs-Mechanismus"									M5			
	1.4 Aufbau Funktionsdemonstrator												M8
AP2 ITFT	2.1 Recherche												
	2.2 Materialuntersuchungen						M3						
	2.3 Bauteilgeometrie										M6		
AP3 itke	3.1 Funktionsdeterminanten												
	3.2 Entwicklung 3D Gelenk							M4					
	3.3 Demonstrator												
	3.4 Steuerung											M7	
AP4	Bericht und Veröffentlichungen												

M1: Pflichtenheft Materialien / Gesamtkonzept
M2: Materialien; Sensorik, Messtechnik, PV definiert
M3: Mechanische Charakterisierung abgeschlossen
M4: Modell elastisch verformbares 3D Gelenk
M5: „Arretierungs-Mechanismus“ technisch umgesetzt
M6: Techn. Umsetzung 3D Gelenk
M7: Steuerprogramm für Demonstrator
M8: Demonstrator

Abbildung 3 Arbeitspakete und Meilensteinplanung in der Studie „3DSunTrack“.

3 Durchgeführte Forschungsarbeiten und Forschungsergebnisse

Um das Potenzial der vorgeschlagenen Lösung als adaptive, der Sonne nachgeführte Fassade zu demonstrieren, wurde ein voll beweglicher Demonstrator gebaut. Bei diesem Demonstrator handelt es sich um eine Abstraktion des Entwurfs einer Südfassade, die mit achteckigen, 1-achsig nachgeführten Solarmodulen bedeckt ist, die sich um bis zu 160° biegen können. In ihrem ursprünglichen, nicht aktuierten (Kissen nicht mit Druckluft beaufschlagt) Zustand stehen die Module senkrecht (90°) zur Glasfassade und können (aktuiert) um $+80^\circ$ nach links oder -80° nach rechts gebogen werden. Abbildung 4 zeigt schematisch, wie die verglaste Fassade von den Modulen abgedeckt werden könnte, wenn sie nicht aktuiert, bzw. nach rechts oder nach links aktuiert/gebogen sind.

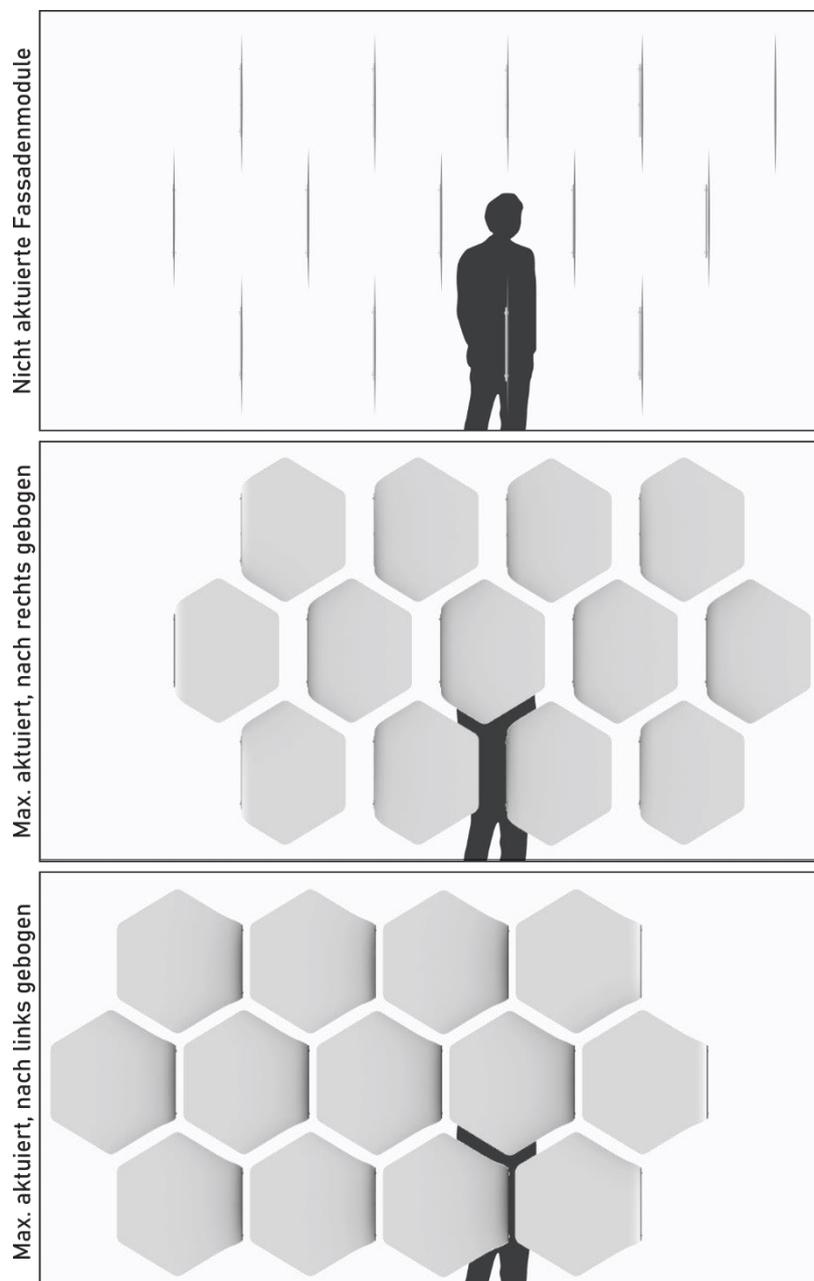


Abbildung 4 Fassadenabdeckung bei nicht aktuierten, adaptiven Solarmodulen (oben) und bei maximaler Aktuierung nach rechts (Mitte) oder links (unten).

3.1 Solare Nachführung

Da Sonneneinfall und Sonnenwinkel je nach Standort unterschiedlich sind, gibt es keine feste Lösung, die weltweit die gleichen Ergebnisse liefern könnte. Die meist verbreitete Variante einer 1-achsigen Nachführung ist ein mit PV-Modulen bestückter Rahmen, der auf einem massiven Mast befestigt ist. Das Modulfeld folgt der Sonne entweder nur horizontal nach dem Anstellwinkel der Sonne oder vertikal nach der Sonnenbahn. 2-achsige Solartürme werden horizontal und vertikal nachgeführt und suchen für maximale Energieausbeute mit dem Tracker-Sensor immer den hellsten Punkt am Himmel, welcher bei bedecktem Himmel z. B. auch Wolkenränder sein können. Reflexionen durch Schnee oder helle Flächen wie Fassaden können ebenfalls zu einer abweichenden Ausrichtung führen. Abbildung 5 zeigt vier Städte in verschiedenen Breitengraden, die ausgewählt wurden, um die einfallende Sonneneinstrahlung auf fest installierte Oberflächen in verschiedenen Ausrichtungen und auf Oberflächen mit einer 1- und 2-Achsen-Nachführung zu analysieren.

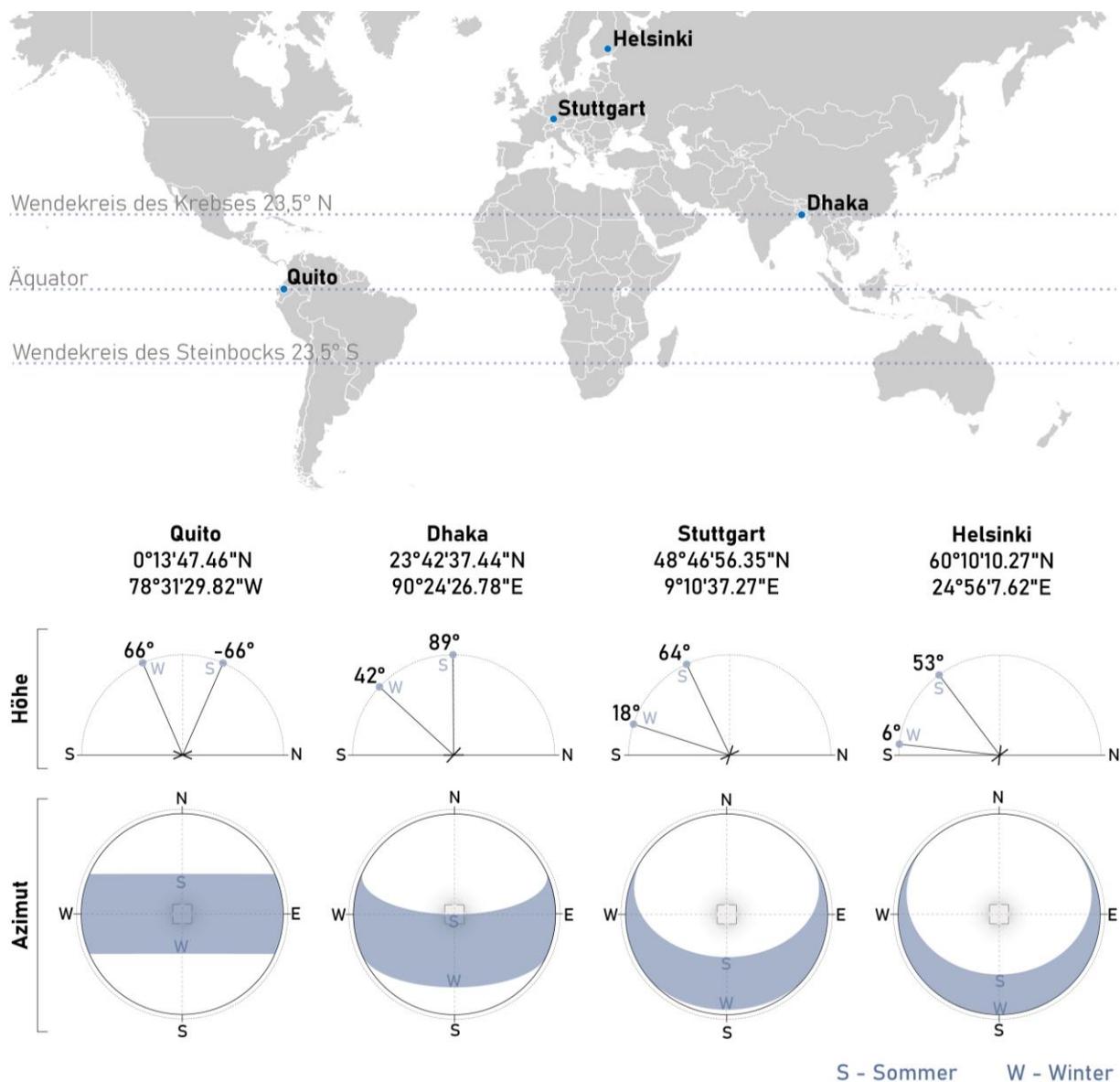


Abbildung 5 Analyisierte Städte in verschiedenen Breitengraden.

Abbildung 6 zeigt das Potenzial der Solarnachführung mit einer 1-achsigen Nachführung auf einer vertikalen Fläche, die der Sonne den ganzen Tag über folgt, sowie mit einer 2-Achsen-Nachführung für eine jahreszeitlich-tägliche Nachführung. Im Diagramm wird darüber hinaus der Vergleich gezogen

zwischen statischen PV-Elementen entsprechend der unterschiedlichen Himmelsrichtungen, bzw. horizontal auf dem Dach, ausgerichtet und der 1-achsigen bzw. 2-achsigen Nachführung.

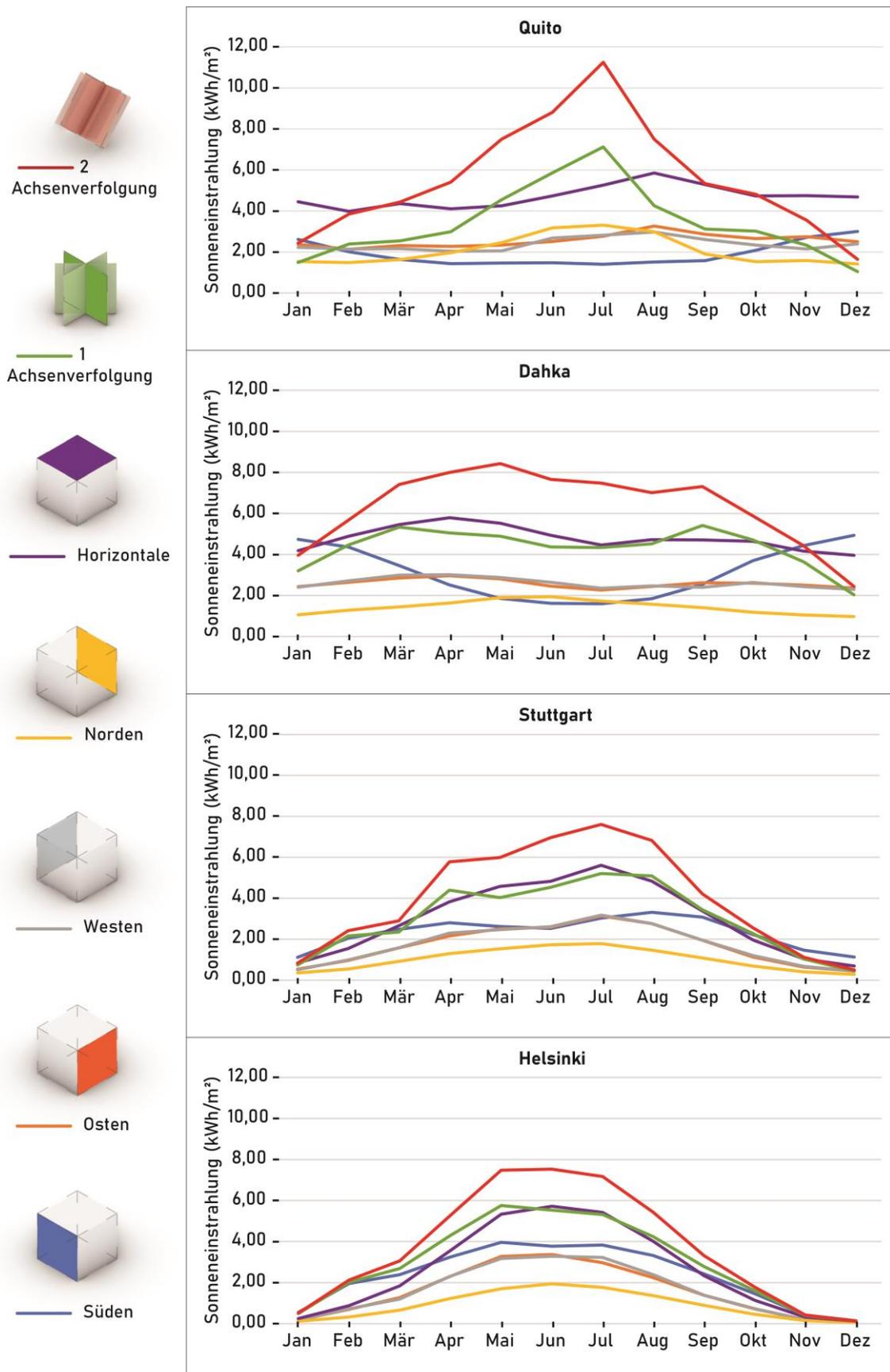


Abbildung 6 Einfallende Sonnenstrahlung auf horizontale Flächen, vertikale Flächen mit unterschiedlicher Ausrichtung (statische Module) und mit zwei Arten der Sonnennachführung (1-achsig und 2-achsig).

An Orten oberhalb des Äquators würden Module mit 1-achsiger Nachführung genauso viel Energie liefern, wie ein festes Solarmodul auf einer horizontalen Fläche (z. B. einem Dach). Dies ist vor allem in städtischen Gebieten von Vorteil, in denen vertikale Flächen (Fassaden) vorherrschen. Ein 2-achsiger nachgeführtes Modul würde erwartungsgemäß einen höheren Ertrag an Solarenergie liefern. In diesem Fall wären die Module jedoch nicht mehr parallel zu den vertikalen Flächen (Fassaden), und die Neigung der Paneele würde die Komplexität der Konstruktion und eine mögliche Überschattung der Module erhöhen.

3.2 Aktuator

Für das Tracking der Sonneneinstrahlung/Maximierung des PV-Ertrags einer Fassade sind in der Studie „3DSunTrack“ Elemente aus Faserverbundkunststoff vorgesehen deren Oberfläche mit Dünnschicht-Photovoltaik funktionalisiert wird. Im FVK sind Gelenkzonen integriert, über die sich die Verformung einstellen lässt. Die Bewegung selbst wird durch in die Gelenkbereiche integrierte pneumatische Kissen ausgelöst. Die Kissen sind asymmetrisch – mit Blick auf die Steifigkeitsverteilung im FVK ober- und unterhalb eines Kissens – in den Lagenaufbau des Faserverbundkunststoffs integriert. Hierdurch kann sich das Kissen stärker in eine Richtung ausdehnen und eine Verformung des FVK hervorrufen, vgl. Abbildung 7

Die pneumatischen Aktuatoren werden aus einem 70 den (170 g/m²) beschichteten Nylon hergestellt. Dieses leichte und luftdichte Gewebe ist auf einer Seite mit einem thermoplastischen Polyurethan beschichtet, so dass es schweißbar ist. Die spezifische Form des Kissens wird aus einer PTFE-Folie hergestellt, die zwischen zwei Lagen des Gewebes gelegt wird, während diese dann miteinander heiß verpresst werden. Durch dieses Verfahren werden die das PTFE umgebenden Kanten des TPU-beschichteten Nylon-Gewebes miteinander verbunden, so dass ein pneumatisches Kissen entsteht, das je nach Bedarf mit Druck beaufschlagt werden kann. Ein pneumatischer Steckanschluss wird mit einer Ohrklemme luftdicht an dem Kissen befestigt. Der so hergestellte pneumatische Aktuator wird in die Kavität (hergestellt durch Tefloneinleger im FVK, vgl. Abbildung 8 bzw. Abschnitt 3.3) in das Gelenk eingeschoben. Innerhalb der Studie werden ausschließlich Kissen/Teflonstreifen mit einer Breite von 100 mm verwendet.

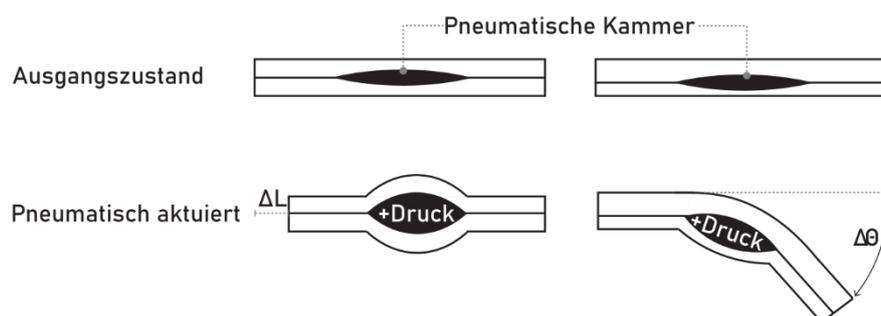


Abbildung 7 Prinzip der Verformung durch integrierte pneumatische Aktuierung in Form eines Kissens.

Bisherige Untersuchungen der beteiligten Institute beschränkten sich auf zweidimensionale Verformungen eines FVK durch die pneumatische Aktuierung eines Kissens im Faserverbundwerkstoff, bzw. die Verformung um mehr als 90° in eine Richtung durch die Implementierung mehrerer nebeneinander liegender Kissen. In der Studie „3DSunTrack“ werden – mit dem Ziel ein Bauteil zu entwickeln, dessen Bewegung dem Sonnenstand folgt – Aufbauten mit zwei Kissen in verschiedenen Laminebenen untersucht. So kann eine Bewegung von bis zu 180° (max. 90° je Biegerichtung) erreicht werden, vgl. Abbildung 16.

3.3 Faserverbund

Innerhalb der Studie „3DSunTrack“ wurden, aufbauend auf den bisherigen Arbeiten des ITFT, verschiedene Materialien für die technische Umsetzung von dreidimensional verformbaren Faserverbundkunststoffen in Betracht gezogen. Hierzu gehören zum einen duroplastische Materialsysteme [2, 3, 9, 11, 13, 14, 17] und thermoplastische Materialsysteme [9]. Neben den bereits publizierten thermoplastischen Materialsystemen wurden auch Aufbauten aus Tapes (Matrix: Polyamid/Polypropylen; Faser: Carbon, Glas, Flachs), die zurzeit innerhalb des Projektes „Flectionation“ (ZIM, Förderkennzeichen KK5293301 EB1) untersucht werden in Betracht gezogen. Aufgrund der größeren Datenbasis im Hinblick auf die mechanischen Kennwerte (vgl. Tabelle 1) und der höheren Nachgiebigkeit durch den großen elastomeren Anteil im Gesamtverbund, wurde für die Studie der in [2] im Detail mechanisch charakterisierte Aufbau aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), Elastomer auf Ethylvinylacetat (EVA)-Basis (HHZ9628/82; Gummiwerk KRAIBURG GmbH & Co. KG) und einer Oberflächenkaschierung aus TPU (Thermoplastisches Elastomer auf Urethanbasis) ausgewählt.

Tabelle 1 Materialkennwerte ausgewählter Materialien innerhalb der Studie „3DSunTrack“ (*aus [2], **basierend auf dem TDS von Gummiwerk KRAIBURG GmbH & Co. KG, ***rechnerisch ermittelt basierend auf TDS bei 50 % Dehnung).

Material	Faserorientierung in °	$E_{\parallel,\perp}$ in MPa	$R_{\parallel,\perp}$ in MPa	$R_{\parallel\perp}$ in MPa	ρ in g/cm ³	h in mm
ET222*	0/90	16.628,61	546,50	258,58	2,02	0,12
HHZ82**	-	5,6***	12,5	12,5	1,37	0,49
TPU*	-	126,43	7,16	7,16	1,10	0,25

Entsprechend der in [13, 14] beschriebenen Arbeiten zur Integration eines Kissens in den FVK, wurde das Kissen zwischen zwei elastomeren Schichten integriert. Ähnlich zu [14] wird durch einen Teflonstreifen ($b=100$ mm) eine Hohlkammer im FVK erzeugt, in die das Kissen nachträglich eingeschoben wird. Im Gegensatz zu den Arbeiten in [14], wird in dieser Studie die Integration von zwei Kissenkammern mit einer theoretisch resultierenden Bewegung um bis zu 180° Biegewinkel (vgl. Abbildung 8) für die Solar-Nachführung untersucht. Bei der Aktuierung eines Kissens im FVK liegen in diesem Beispiel jeweils drei Schichten HHZ82 und sechs Schichten ET222 auf der steifen Seite des FVK.

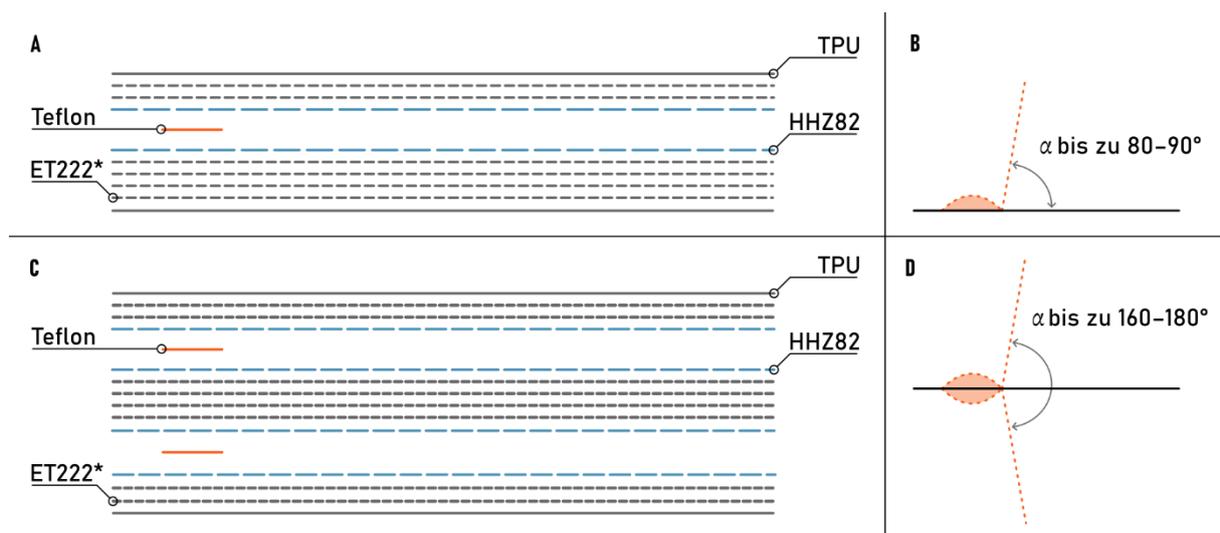


Abbildung 8 Laminataufbauten aktuierbarer FVK aus ET222*, HHZ82 und TPU (Querschnitt).
 A Lagenaufbau mit einer Aktuierungskammer analog zu [14] mit zwei Lagen ET222 auf der flexiblen Seite und vier Lagen ET222 auf der steifen Seite, B Resultierende Bewegung im FVK mit einer Aktuierungskammer, C Lagenaufbau mit zwei Kissen gegenüberliegend, D theoretisch mögliche Verformung bei der Integration von zwei gegenüberliegenden Kammern im FVK.
 *ET222 mit einer Faserorientierung von $\pm 45^\circ$

Innerhalb der Studie „3DSUnTrack“ wurde ein Versuch durchgeführt, zwei Kissen ($b=100\text{ mm}$) wie in Abbildung 9B gezeigt in den Laminataufbau zu integrieren. Der resultierende Biegewinkel beträgt 90° je Richtung, jedoch ist die Stabilität des Gesamtaufbaus/die Bewegungskontrolle erheblich reduziert. Darüber hinaus behindert die im Kissen verbleibende Luft nach der Aktuierung in die eine Richtung die Verformung in die andere Richtung.

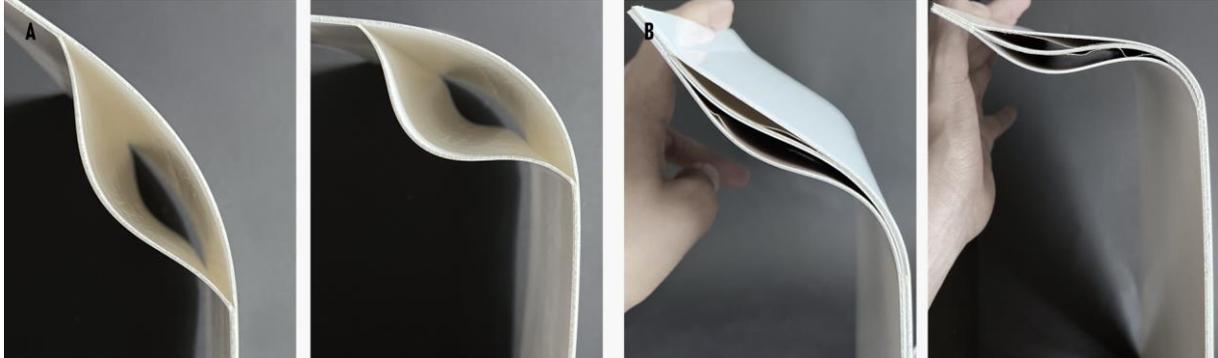


Abbildung 9 Vergleich der Verformung (per Hand ohne Kissen in Kissenkammer) des Laminats bei der Integration von A einer Kissenkammer und B zwei Kissenkammern.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde eine Versuchsreihe durchgeführt bei der die Kissen nebeneinander im Laminataufbau integriert wurden. Der Aktuierungsbereich wird durch die Platzierung der Kissen nebeneinander deutlich vergrößert, so dass innerhalb dieser Studie die Möglichkeit einer Überlappung der Kissen in verschiedenen Breiten (0–50 mm) untersucht wurde. Die Überlappung ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Eine Überlappungsbreite von $b_{\text{Ü}} = 0\text{ mm}$ beschreibt eine Anordnung der Kissen direkt nebeneinander/aneinander angrenzend, während eine Überlappungsbreite von $b_{\text{Ü}} = 50\text{ mm}$ eine 50 mm breite Überlappung benennt.

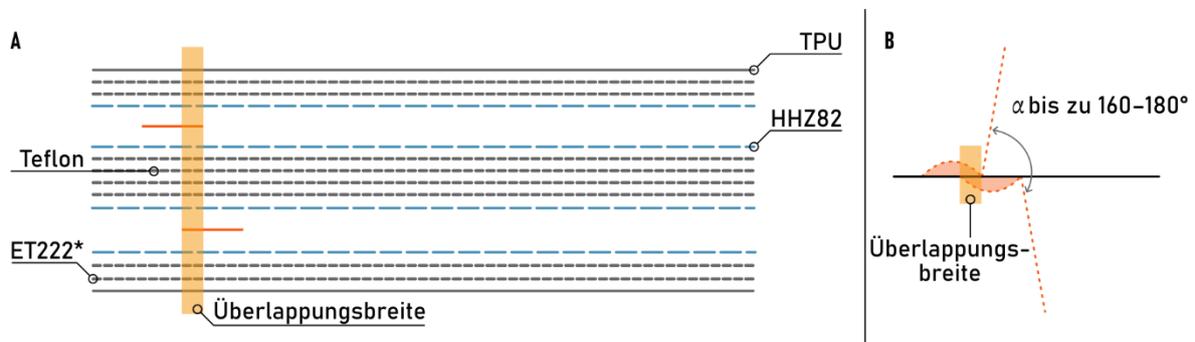


Abbildung 10 Lagenaufbau mit vier Lagen ET222 (Faserorientierung $\pm 45^\circ$) in der Laminatmitte und beispielhaft eingezeichneter Überlappungsbreite der integrierten Teflonstreifen. A Schematische Darstellung des Lagenaufbaus (Querschnitt) und B Schematische Darstellung der resultierenden Verformung der Flaps durch den Kissenversatz.

In der gleichen Versuchsreihe wurde auch die Steifigkeit der Laminatmitte variiert (4–10 Lagen ET222 mit einer Faserorientierung von $\pm 45^\circ$). Der gesamte Versuchsplan ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2 Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Materialsteifigkeiten und Überlappungsbreiten auf die Verformung des Faserverbundkunststoffs.
Mehrstufiger, faktorieller Versuchsplan erstellt mit der Software Minitab.

Überlappungsbreite	in mm	25	0	25	10	25	0	50	10	0	0	10	25	50	50	10	50
Anzahl Lagen ET222 zwischen den Kissen in Laminatmitte	-	8	6	6	8	10	10	6	4	8	4	10	4	8	4	6	10

Bei der Vermessung der Versuchsbauteile wurde ein Zielwinkel vorgegeben und der erreichte Winkel optisch mittels Laser gemessen. Neben dem erreichten Biegewinkel erfasst der Prüfstand (vgl. [14]) während der Messung auch den hierfür notwendigen Luftdruck.

Die Haupteffekte auf den notwendigen Luftdruck zur Erreichung des Zielwinkels sind in Abbildung 11 beispielhaft für einen Biegewinkel von 75° gezeigt. Es ist zu sehen, dass der Zielwinkel analog zu den versteifenden ET222-Lagen in der Laminatmitte einen linear steigenden Einfluss auf den notwendigen Luftdruck hat. In Bezug auf die Überlappungsbreite lässt sich feststellen, dass hier ein Minimum zwischen 25 und 50 mm liegen muss.

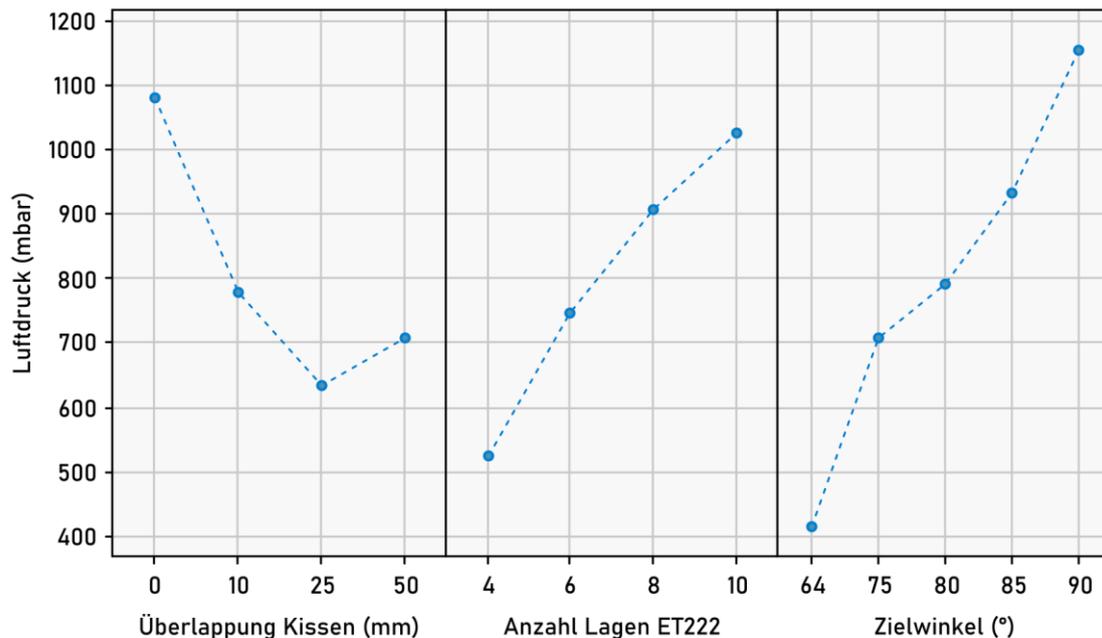


Abbildung 11 Haupteffekte auf den notwendigen Aktuierungs-Luftdruck.

Zur genaueren Bestimmung dieses Minimums wurde eine Regressionsanalyse der Daten für verschiedene Biegewinkel bei einem Lagenaufbau mit vier ET222-Lagen in der Laminatmitte durchgeführt. In Abbildung 12 ist die bestimmte Ausgleichsfunktion beispielhaft für einen Biegewinkel von 75° /4 Lagen ET222 in der Laminatmitte gezeigt.

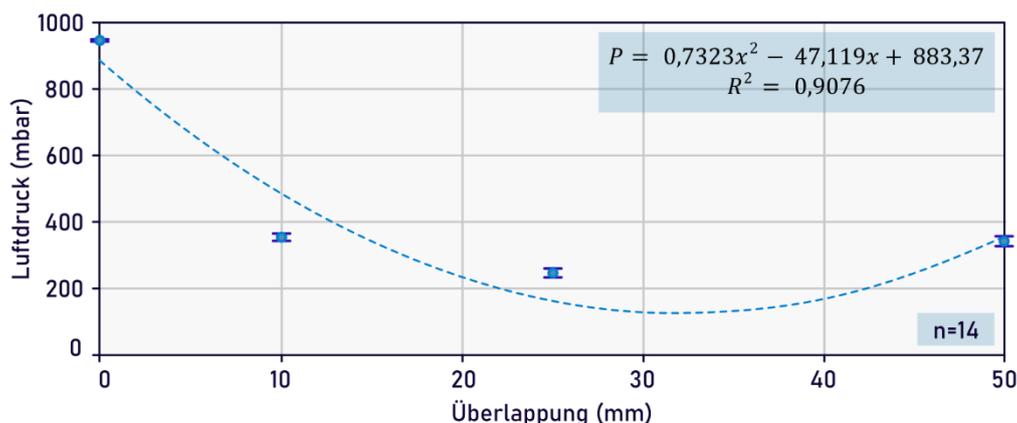


Abbildung 12 Abhängigkeit zwischen verschiedenen Überlappungsbreiten der zwei Kissen notwendigen Luftdruck zur Aktuierung für einen Biegewinkel von 75° (4 Lagen ET222 in der Laminatmitte).

Durch Ableitung der Ausgleichsfunktion und Bestimmung der Extremstellen (vgl. Formeln (3.1) und (3.2)) kann das Minimum auf 32,17 mm Überlappungsbreite festgelegt werden. Für andere Biegewinkel

bewegt sich das Minimum für den Aufbau mit 4 Lagen ET222 in der Laminatmitte auf einem ähnlichen Niveau, vgl. Tabelle 3.

$$\begin{aligned}
 P &= 0,7323x^2 - 47,119b_{\ddot{u}} + 883,37 \\
 R^2 &= 0,9076 \\
 P &= \text{pneumatischer Druck [mbar]}, \\
 b_{\ddot{u}} &= \text{Überlappungsbreite [mm]}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 P' &= 1,46b_{\ddot{u}} - 47,119 \\
 0 &= 1,46b_{\ddot{u}} - 47,119 \\
 b_{\ddot{u}} &= 32,17
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Der stichprobenartige Vergleich mit anderen Laminataufbauten (6 und 8 Lagen ET222 in der Laminatmitte) zeigt, dass die Ergebnisse auf einem ähnlichen Niveau liegen, vgl. Tabelle 3. Es ist allerdings zu empfehlen diese Analyse abhängig von verschiedenen Materialien und Steifigkeiten detailliert zu wiederholen, um hier steifigkeitsspezifische Aussagen treffen zu können.

Tabelle 3 Resultierende Überlappungsbreiten für minimalen Luftdruckaufwand bei Biegewinkel 75–90° für Lagenaufbau mit vier Lagen ET222 in Laminatmitte (zwischen den Kissen) und Vergleich mit verschiedenen Lagenaufbauten und Zielwinkeln.

Zielwinkel	in °	75	80	85	90	75	75	80
Anzahl Lagen ET222 zwischen den Kissen in Laminatmitte	-	4	4	4	4	6	8	8
Überlappungsbreite für minimalen Luftdruckaufwand	in mm	32,17	30,97	30,31	32,02	38,35	33,39	31,55
Gerundete Werte für die Überlappungsbreite	in mm	30	30	30	30	40	35	30

Die lineare Zunahme des notwendigen Luftdrucks P kann in Abhängigkeit von der Anzahl der Lagen ET222 (Faserorientierung $\pm 45^\circ$) mit der nachstehenden Formel beschrieben werden.

$$\begin{aligned}
 P &= 116,33 * n_{ET222} - 252,66 \\
 R^2 &= 0,9699
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
 P &= \text{pneumatischer Druck [mbar]} \\
 n_{ET222} &= \text{Anzahl Lagen ET222}
 \end{aligned}$$

Für den zweiten innerhalb diese Studie analysierten Zielwert „realer Winkel“ lassen sich die in Abbildung 13 gezeigten Haupteffekte in Abhängigkeit der einstellbaren Parameter „Zielwinkel“, „Anzahl Lagen ET222“ und „Überlappungsbreite“ messen. Es ist festzustellen, dass durch die Parameter „Überlappungsbreite“ und „Anzahl Lagen ET222“ im Verhältnis zum vorgegebenen Zielwinkel effektiv kaum einen Einfluss auf das Erreichen desselbigen haben. Die Analyse der Effekte mittels eines Pareto zeigt, dass der Effekt durch die Versteifung mittels zusätzlicher Lagen ET222 marginal berücksichtigt werden kann. Ursächlich ist, dass bei höherer Steifigkeit die Bewegung des Laminats eingeschränkt wird. Im Extremfall kann das Laminat so steif werden, dass eine Biegung nicht mehr möglich ist.

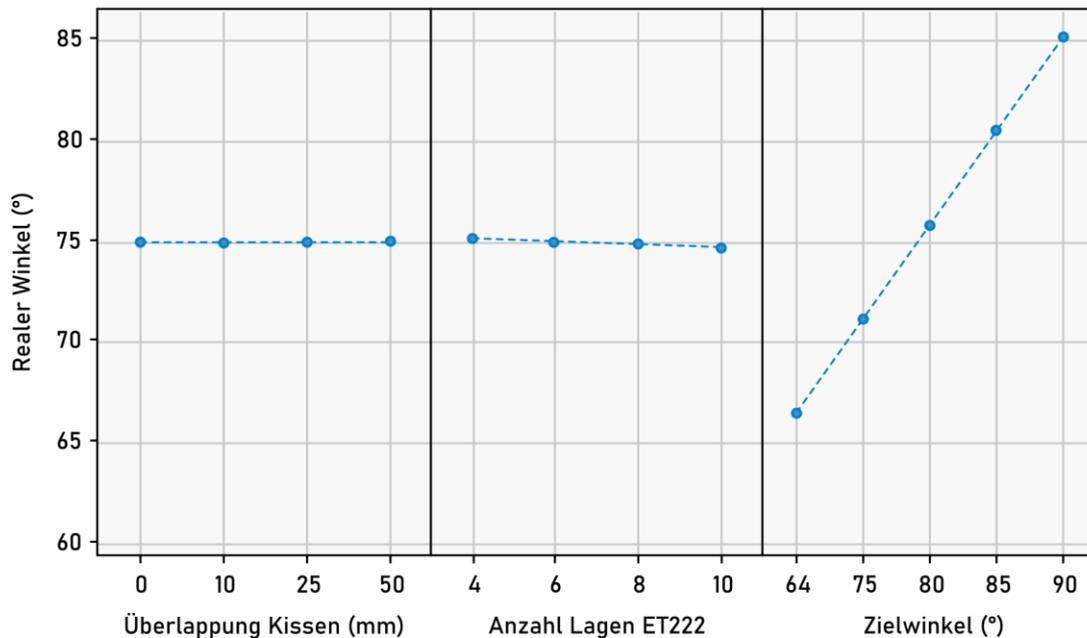


Abbildung 13 Haupteffekte auf den messbaren realen Winkel.

Unter Berücksichtigung dieses Aspektes lautet die lineare Regressionsformel für den realen Biege-
winkel (RW) wie folgt:

$$RW = 1,861 + 0,92919 * ZW - 0,0778 * n_{ET222}$$

$$R^2 = 0,9742$$

$$RW = \text{realer Biegewinkel } [^\circ]$$

$$ZW = \text{Zielwinkel } [^\circ]$$

$$n_{ET222} = \text{Anzahl ET222 Lagen}$$
(3.4)

Für die innerhalb von „3DSunTrack“ durchgeführte Materialstudie mit angeschlossener Regressions-
analyse zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Überlappungsbreiten von zwei Kissen im La-
minat sowie unterschiedlicher Steifigkeiten kann abschließend festgehalten werden:

- (I) Die Überlappung der Kissen ermöglicht die gleichmäßige Aktuierung des Laminats in beide Richtungen um ca. $\pm 90^\circ$ (Rotationswinkel 180°). Darüber hinaus stellt sich ein Optimum der Überlappungsbreite im Hinblick auf den notwendigen Luftdruck abh. von der Gesamtsteifigkeit des Laminats bei ca. 30 mm ein (4 Lagen ET222 in Laminatmitte), vgl. Tabelle 3.
- (II) Zusätzliche Steifigkeit im Laminat erhöht signifikant den notwendigen Luftdruck zur Aktuierung der Kissen und zur Erreichung des Zielwinkels, vgl. Formel (3.3).
- (III) Weder Überlappungsbreite noch Steifigkeit der Laminatmitte beeinflussen direkt den realen Biege-
winkel. Dieser wird lediglich durch die Steifigkeit des Laminats ab einem bestimmten Steifigkeitsniveau eingeschränkt (Verformung wäre nicht länger möglich, da das Laminat zu steif ist). Im untersuchten Steifigkeitsbereich (4–10 Lagen ET222 in Laminatmitte) wird der reale Biege-
winkel ausschließlich von dem vorgegebenen Zielwinkel beeinflusst, bzw. direkt über diesen eingestellt.

3.4 Demonstrator

Der Demonstrator besteht aus vier Modulen, die auf eine leichte, bewegliche Stahlunterkonstruktion montiert werden, vgl. Abbildung 14. Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Ausrichtung der Module sind dazu gedacht die Module in verschiedenen Szenarien zu testen.

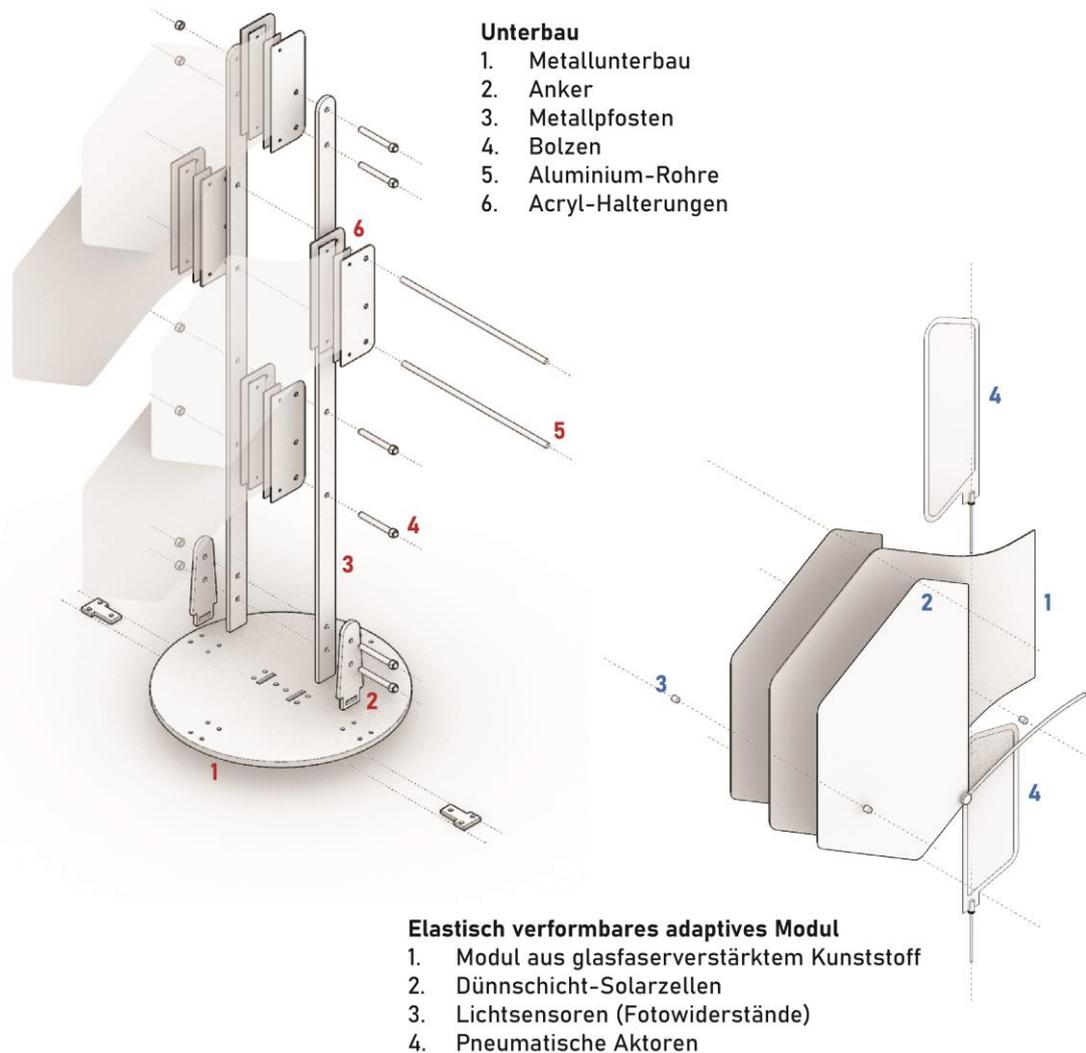


Abbildung 14 Rendering des „3DSunTrack“-Demonstrators.

Die Module, welche in Abbildung 15 im Detail skizziert sind, haben eine Größe von 550 x 575 mm und sind auf jeder Seite mit einer Dünnschicht-Photovoltaik ausgerüstet, die für die spezifischen Abmessungen der Module individuell gefertigt wurden. Die Applikation der Dünnschicht-Photovoltaik erfolgt durch den bereits in der Herstellung einseitig aufgetragenen Klebstoff. Die Photovoltaik-Folien wurden von der Firma ASCA GmbH entsprechend der Endkontur der Demonstratormodule gefertigt. Für eine beidseitige Applikation wurde das Design einer Seite gespiegelt, wodurch sich die Anschlüsse der Folien beidseitig auf der gleichen Position befinden.

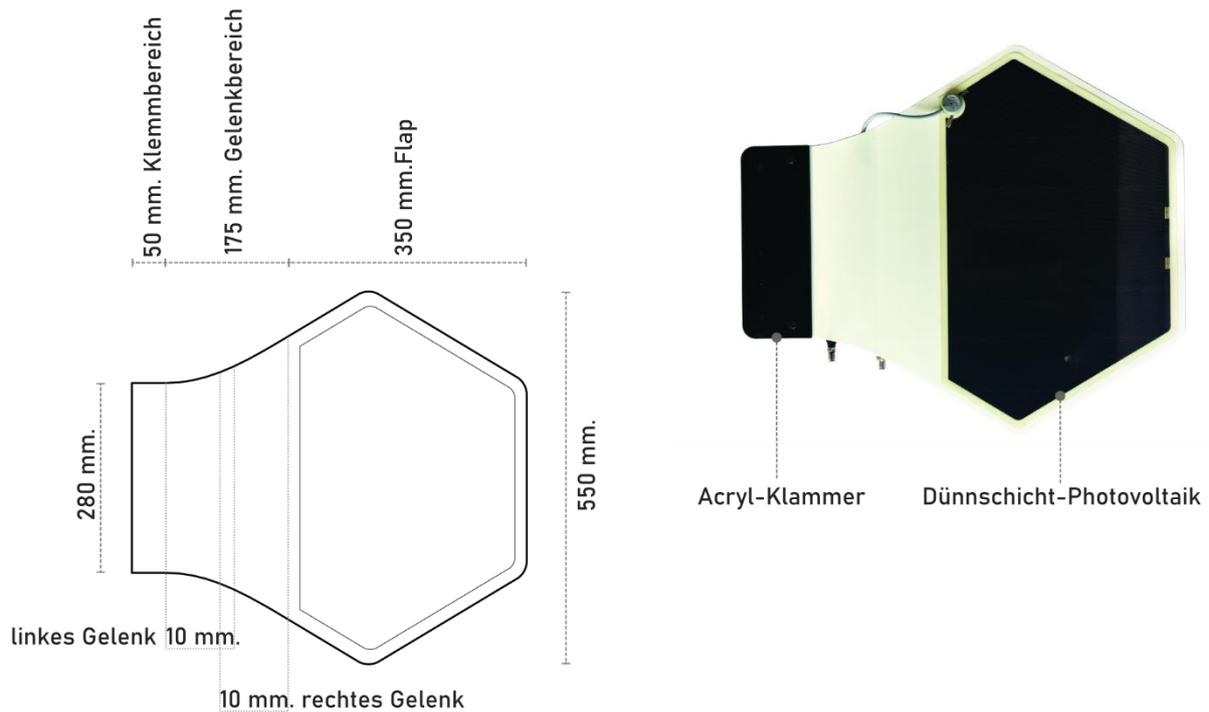


Abbildung 15 Draufsicht auf ein Modul des Demonstrators (links) CAD-Zeichnung mit Bemaßung, (rechts) Foto eines fertiggestellten Moduls mit PV-Folie auf dem beweglichen Flap und Acryl-Klammer zur Befestigung am Demonstrator-Gerüst.

In die Module sind zwei pneumatische Kissen integriert (vgl. Abbildung 16), um die für die Solarnachführung notwendige, bestmögliche Aktuierung in beide Richtungen zu ermöglichen. Die Breite der Kissen beträgt analog zu den in der Studie durchgeführten Versuchen $b_K=100$ mm. Die Überlappungsbreite für den Bau des Demonstrators wurde aufbauend auf den Versuchen auf $b_U=25$ mm festgelegt.

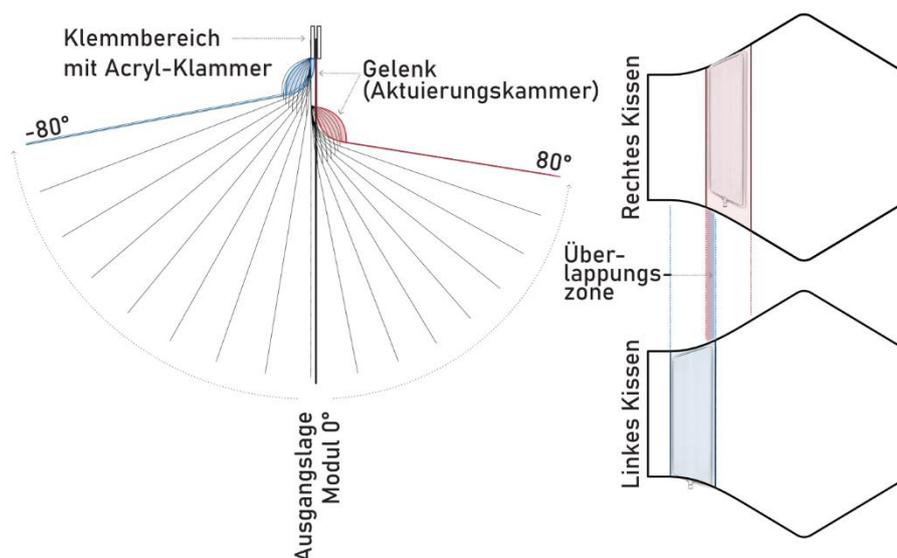


Abbildung 16 Diagramm der Kissengeometrie und -platzierung mit Kennzeichnung des Überlappungsbereiches sowie Darstellung der resultierenden Bewegung.

Die vier Module arbeiten als Gruppe und sind Teil eines Nachführungs- und Pneumatiknetzwerks. In der Nachführungslogik, die innerhalb der Studie entwickelt wurde (vgl. Abbildung 17), werden die Module hellsten Punkt am Himmel nachgeführt, um den maximalen Solarstrom-Ertrag zu erreichen, auch wenn die Sonne verdeckt wird.

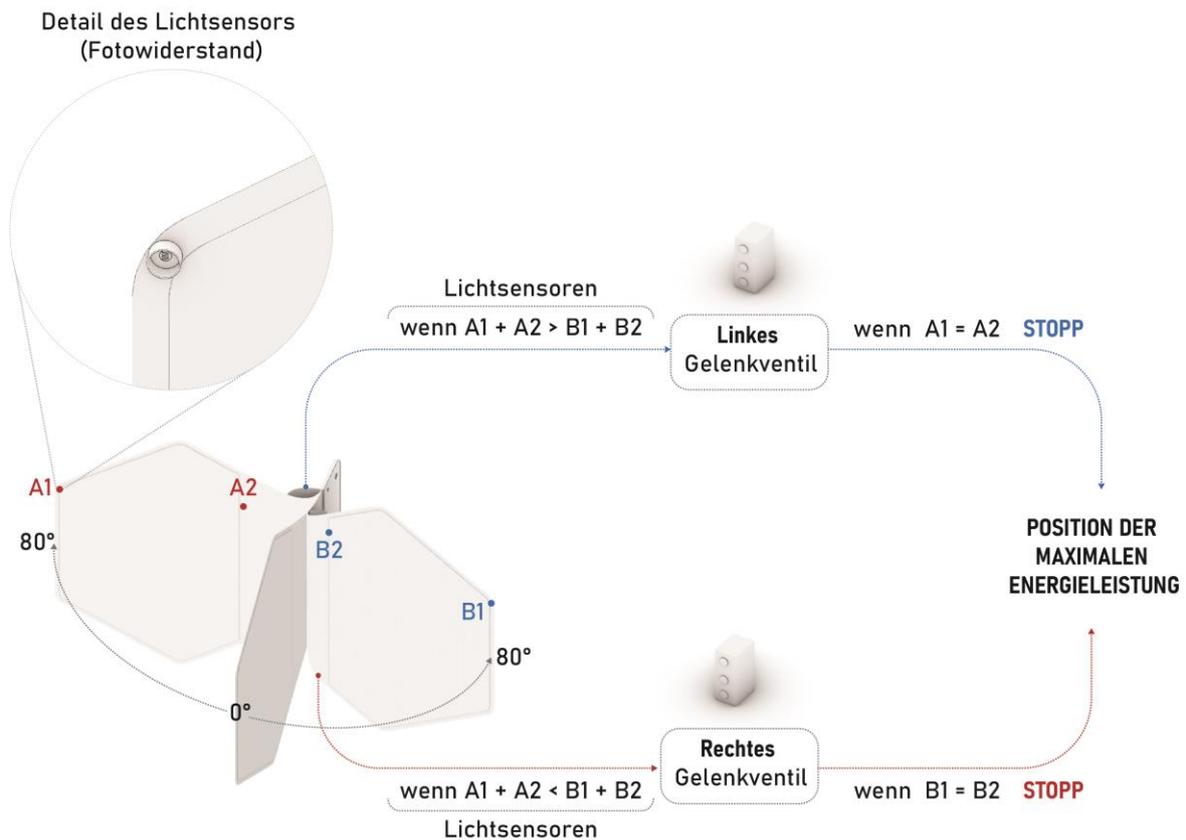


Abbildung 17 Diagramm zur Nachführlogik.

Durch die beidseitige Ausrüstung mit einer Dünnschicht-Photovoltaik, erhält das hintere Modul immer noch eine gewisse Reststrahlung durch die Reflexionen der Fassade, wenn eine Modulseite exakt zur Lichtquelle ausgerichtet steht. Für die Nachführung ist auf jeder Seite des Moduls ein Paar Lichtsensoren (Fotowiderstände) angebracht. Das oberste Modul des Netzwerks ist dasjenige, an dem das Solar-nachführsystem angebracht ist. Basierend auf dessen Messwerten werden dieses Modul und die übrigen Module angesteuert. So gibt der höchste Summenwert der Lichtsensor-Paare vor, auf welcher Seite das Modul aktuiert werden muss, um eine Biegung in die eine oder andere Richtung hervorzurufen und die PV-Oberfläche entsprechend auszurichten. Ist der Messwert auf Seite B höher, wird das Ventil, das die rechte Gelenk ansteuert, betätigt und mit pneumatischem Druck beaufschlagt. Das Aufblasen wird gestoppt, wenn die Messwerte beider Sensoren auf Seite B gleich sind, was bedeutet, dass die PV-Oberfläche senkrecht von der Lichtquelle getroffen wird.

Das Tracking-System wurde als Prototyp in Arduino unter Verwendung einer Controllino-SPS entwickelt. Dies bietet genügend Flexibilität, um eine Vielzahl von Sensoren und Ventilen anzuschließen und gleichzeitig die Einfachheit von Arduino bei der Prototypenerstellung zu nutzen. Abbildung 21 zeigt die für das Nachführsystem verwendeten Komponenten. Die Ergebnisse der Lichtsensoren geben den Ausgangsdruck der Druckregler vor. Bei den in dieser Studie verwendeten Druckreglern zur Steuerung des Ausgangsdrucks in den pneumatischen Aktuatoren handelt es sich um VPPM-6L-L-1-G18-OL2H-V1N von der Firma Festo mit einem Betriebssignal in Form einer Analogspannung im Bereich von 10 VDC und einer Spannungsversorgung von 24 VDC.

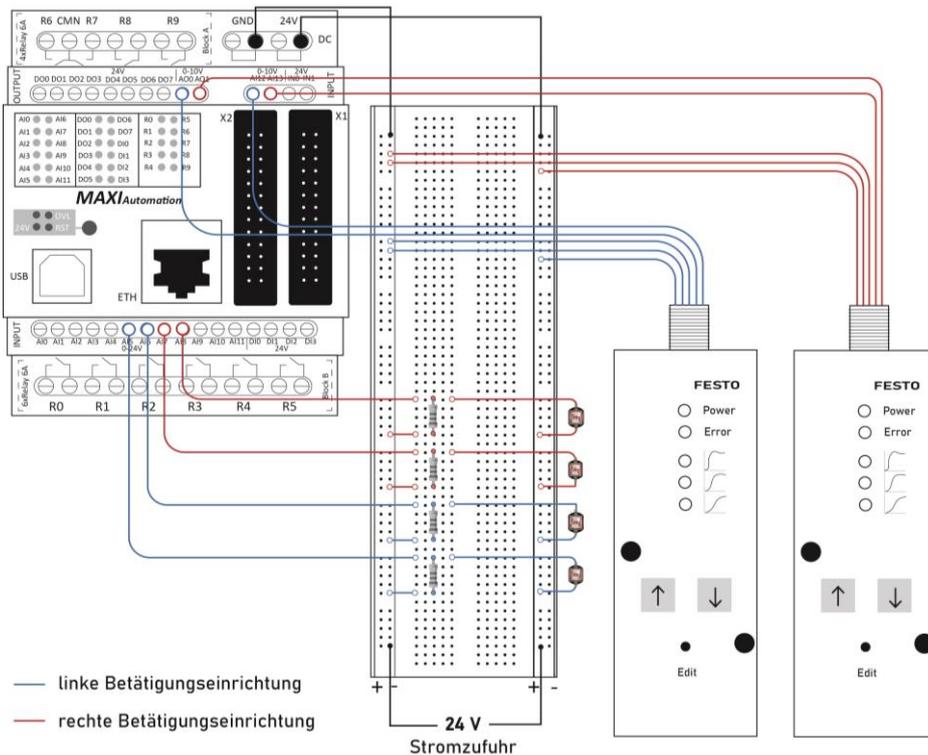


Abbildung 18 Elektronische Schaltpläne für das Ortungssystem der Solarnachführung.

Zur Bewertung des Potenzials zu Energiegewinnung bei unterschiedlichen Ausrichtungen der Module, wurde die Leerlaufspannung von nicht aktuierten und um 80° nach Süden ausgerichteten Modulen an einem Tag mit wolkenlosem Himmel/geringer Sonneneinstrahlung erfasst, vgl. Abbildung 19.

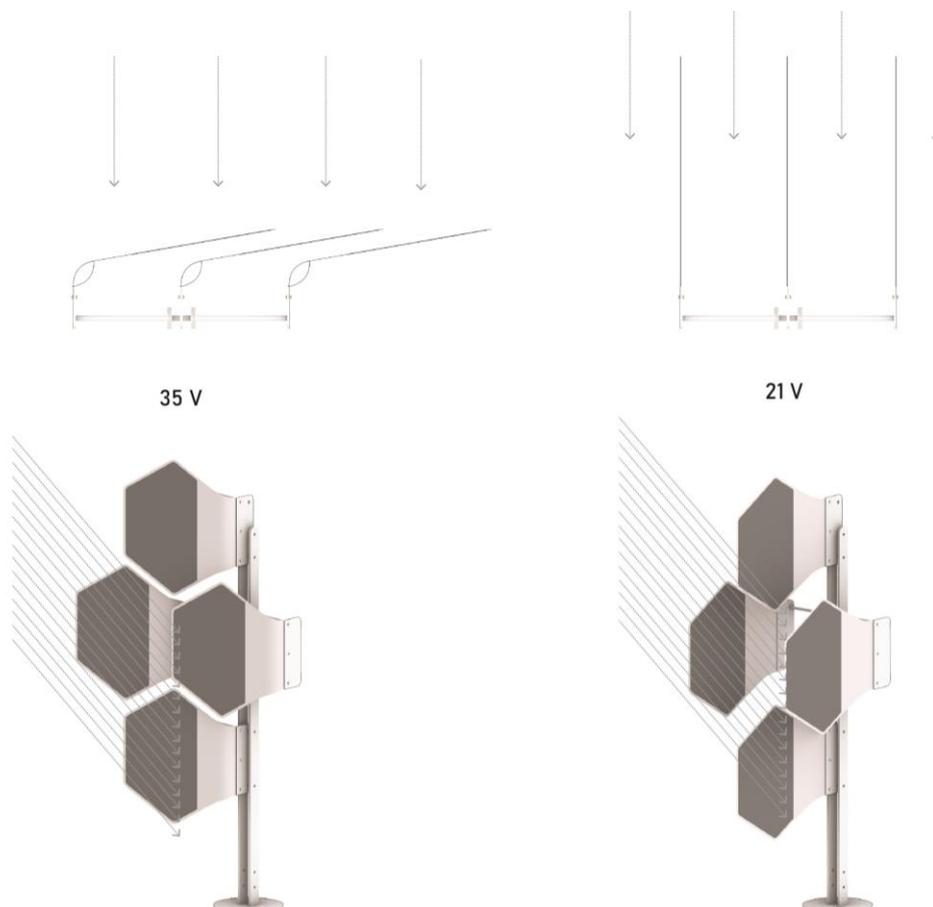


Abbildung 19 Erste Tests mit adaptiven PV-Panels innerhalb der Studie „3DSunTrack“.

Dies dient als erste Analyse, um das Potenzial der adaptiven Module in Bezug auf die Leistungsabgabe zu ermitteln. Für künftige Tests wird die Leistung der Module für acht verschiedenen Betätigungswinkeln evaluiert. Die Bewegungszustände bei unterschiedlicher Aktuierungen sind in Abbildung 20 als Foto-Serie des „3DSunTrack“-Demonstrators dargestellt.

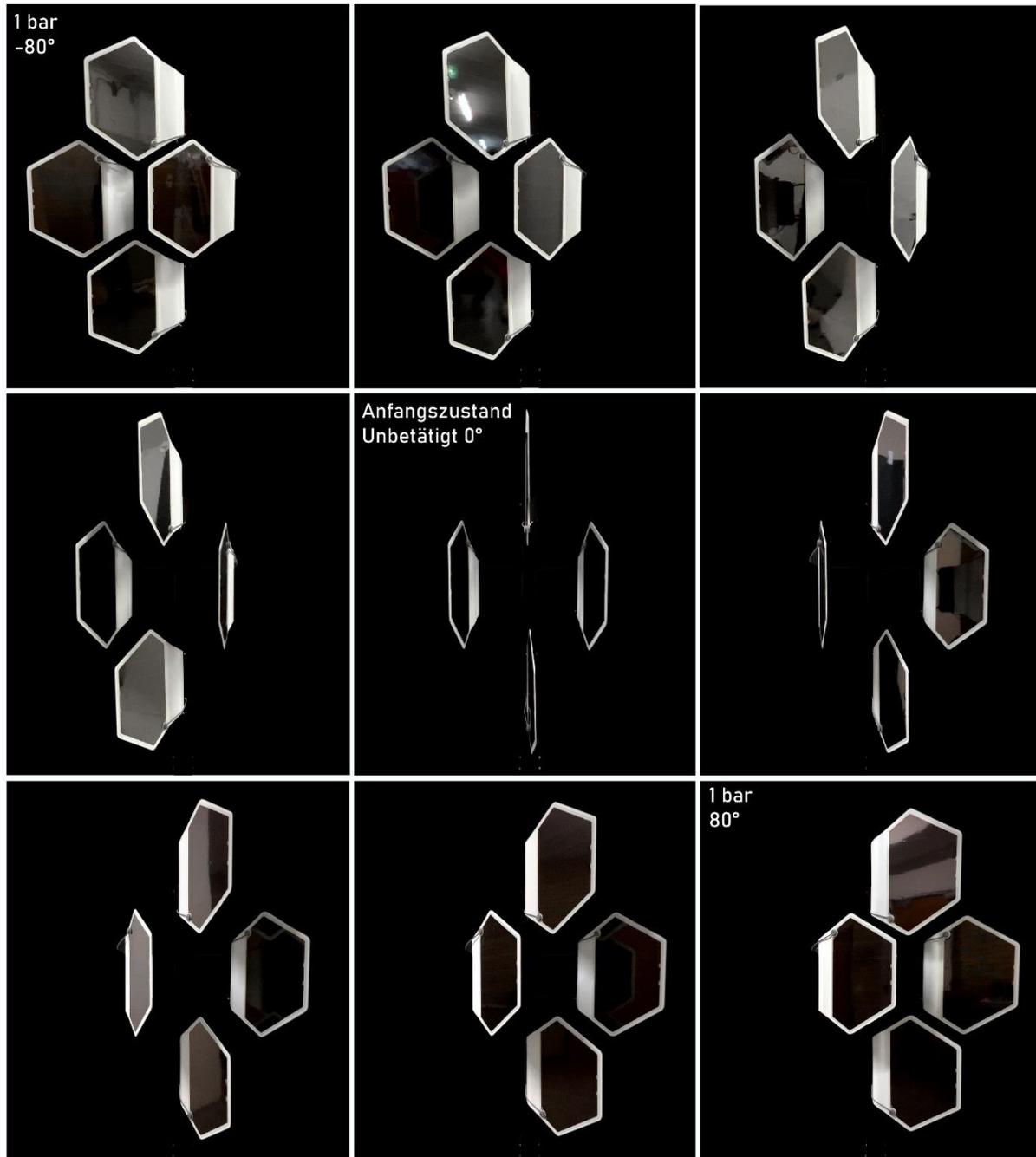


Abbildung 20 Module des „3DSunTrack“-Demonstrators in verschiedenen Aktuierungszuständen.

4 Fazit

Innerhalb der Studie „3DSunTrack“ konnte in 1,5 Jahren interdisziplinärer Forschungs- und Entwicklungsarbeit ein Demonstrator entwickelt werden. Dieser zeigt zum einen das Potenzial adaptiver FVKs für die technische Umsetzung nachgiebiger Mechanismen, zum anderen aber auch das Potenzial der Energiegewinnung aus Fassaden. Bisher werden Glasfassaden ausschließlich verschattet, um Energie für die Klimatisierung der Gebäude einzusparen. – mit dem Ansatz der Oberflächenfunktionalisierung von Verschattungssystemen durch Dünnschicht-Photovoltaik, kann allerdings parallel sogar Energie gewonnen werden. Die Entwicklungsarbeit zeigt darüber hinaus, dass auch komplexe Nachführungen, wie sie für den bestmöglichen Energiegewinn notwendig sind, durch nachgiebige Mechanismen bzw. adaptive FVK umgesetzt werden können.

Die im Rahmen dieser Studie geleistete Arbeit ist allerdings nur der Anfang einer umfassenden Forschung über Solar-Nachführsysteme für die Energiegewinnung in der Architektur. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für künftige Forschung auf diesem Gebiet, da bspw. weitere Tests insbesondere in Bezug auf die PV-Leistung in verschiedenen Szenarien über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden müssen, um die reale PV-Leistung mit den Simulationsergebnissen (vgl. Abschnitt 2.3.1) vergleichen zu können. Abbildung 21 zeigt zwei alternative Anordnungen der Module, die nicht vertikal sind, aber dennoch in einer Fassade verwendet werden könnten und, aufgrund der besseren Positionierung der Module in Bezug auf die Sonnenwinkel, zu einer höheren PV-Leistung führen werden. Auf Basis dieser Untersuchungen können die Simulationen kalibriert werden und für die künftige Auslegung solcher funktionalen Fassaden genutzt werden. Mit dem „3D-SunTrack“-Demonstrator können erste Untersuchungen insbesondere hinsichtlich der 2D-Nachführung durchgeführt werden.

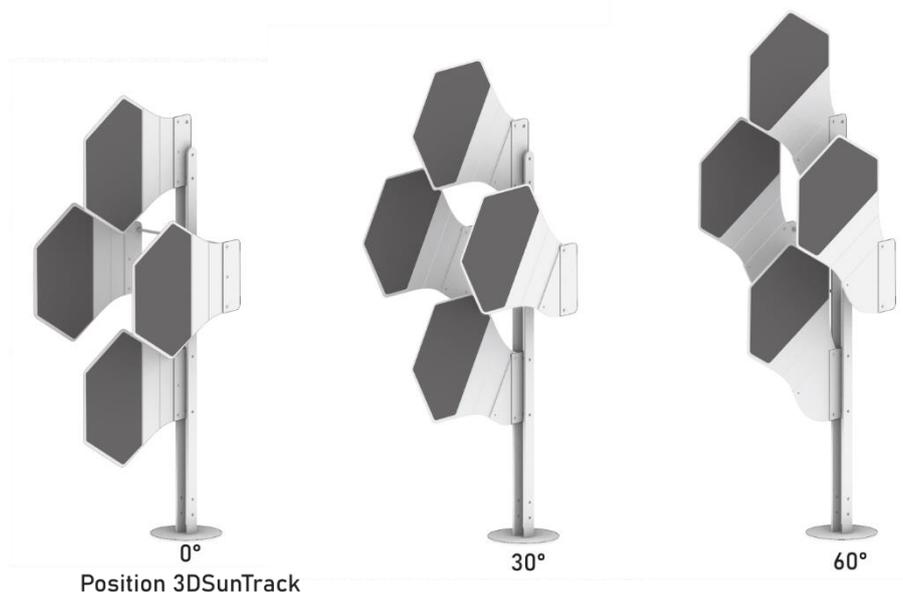


Abbildung 21 Anordnung der Module mit verschiedenen Ausrichtungen in Bezug zu den Sonnenwinkeln.

Die Ergebnisse hinsichtlich der potentiellen Einsparung von Druckluft und somit Energie durch die spezielle Anordnung der Kissen im FVK geben darüber hinaus Anlass zu der Vermutung, dass durch den Materialaufbau und die Geometrie der Aktuatoren sowie deren Anordnung im Faserverbund die Energieeffizienz der Verschattungsfunktion gesteigert werden kann. Hier gilt es allerdings detaillierte und umfassende Untersuchungen durchzuführen, da die bisherigen Ergebnisse dieses Thema lediglich anreißen.

Neben der Untersuchung der funktionalen Komponenten von PV-ausgerüsteten adaptiven Elementen für den Einsatz an Fassaden, gilt es diesen Technologieansatz der Industrie näher zu bringen und in der Baubranche zu etablieren. Im Verlauf der Studie hat sich gezeigt, dass insbesondere die Hersteller von Dünnschicht-Photovoltaik und auch kleinere Hersteller für Verschattungssysteme diesem Ansatz gegenüber aufgeschlossen sind und bei künftigen Projekten eventuell sogar mitwirken würden.

Literaturverzeichnis

- [1] Alkhatib H, Lemarchand P, Norton B, O'Sullivan D (2021) Deployment and control of adaptive building facades for energy generation, thermal insulation, ventilation and daylighting: A review. *Applied Thermal Engineering* 185:116331. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.116331
- [2] Born L (2020) Grundlagen für die Auslegung und Gestaltung eines Hybridmaterials für außen liegende, adaptive Fassadenbauteile aus Faserverbundkunststoff. Universität Stuttgart
- [3] Born L, Körner A, Mader A, Schieber G, Milwich M, Knippers J, Gresser GT (2019) Adaptive FRP Structures For Exterior Applications. *AML* 10(12):913–918. doi:10.5185/amlett.2019.0029
- [4] Alle Solarzellen-Arten, Typen und Unterscheidung einfach erklärt. <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/solarenergie/solarzelle/>. Zugegriffen: 05. Mai 2021
- [5] Gupta N, Tiwari A, Tiwari GN (2017) Exergy analysis of building integrated semitransparent photovoltaic thermal (BiSPVT) system. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 20(1):41–50. doi:10.1016/j.jestch.2016.09.013
- [6] Howell LL (2001) *Compliant mechanisms*. A Wiley-Interscience publication. Wiley, New York, NY
- [7] Hraska J (2018) Adaptive solar shading of buildings. *IRASE* 9(2):107–113. doi:10.1556/1848.2018.9.2.5
- [8] Jayathissa P, Zarb J, Luzzatto M, Hofer J, Schlueter A (2017) Sensitivity of Building Properties and Use Types for the Application of Adaptive Photovoltaic Shading Systems. *Energy Procedia* 122:139–144. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.319
- [9] Körner A, Born L, Mader A, Sachse R, Saffarian S, Westermeier AS, Poppinga S, Bischoff M, Gresser GT, Milwich M, Speck T, Knippers J (2018) Flectofold—a biomimetic compliant shading device for complex free form facades. *Smart Mater. Struct.* 27(1):17001. doi:10.1088/1361-665X/aa9c2f
- [10] Körner A, Born L, Bucklin O, Suzuki S, Vasey L, Gresser GT, Menges A, Knippers J (2021) Integrative design and fabrication methodology for bio-inspired folding mechanisms for architectural applications. *Computer-Aided Design* 133:102988. doi:10.1016/j.cad.2020.102988
- [11] Lienhard J, Schleicher S, Poppinga S, Masselter T, Milwich M, Speck T, Knippers J (2011) Flectofin: a hingeless flapping mechanism inspired by nature. *Bioinspir Biomim* 6(4):45001. doi:10.1088/1748-3182/6/4/045001
- [12] Loonen RC, Favoino F, Hensen JL, Overend M (2017) Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation* 10(2):205–223. doi:10.1080/19401493.2016.1152303
- [13] Mader A, Born L, Körner A, Schieber G, Masset P-A, Milwich M, Gresser GT, Knippers J (2020) Bio-inspired integrated pneumatic actuation for compliant fiber-reinforced plastics. *Composite Structures* 233:111558. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111558
- [14] Mühlich M, González EA, Born L, Körner A, Schwill L, Gresser GT, Knippers J (2021) Deformation Behavior of Elastomer-Glass Fiber-Reinforced Plastics in Dependence of Pneumatic Actuation. *Biomimetics* 6(3). doi:10.3390/biomimetics6030043

- [15] Raugei M, Frankl P (2009) Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks. *Energy* 34(3):392–399. doi:10.1016/j.energy.2009.01.001
- [16] Sandak A, Sandak J, Brzezicki M, Kutnar A (2019) State of the Art in Building Façades. In: Sandak A, Sandak J, Brzezicki M, Kutnar A (Hrsg) *Bio-based Building Skin*. Springer Singapore, Singapore, S 1–26
- [17] Schieber G, Born L, Bergmann P, Körner A, Mader A, Saffarian S, Betz O, Milwich M, Gresser GT, Knippers J (2017) Hindwings of insects as concept generator for hingeless foldable shading systems. *Bioinspir Biomim* 13(1):16012. doi:10.1088/1748-3190/aa979c
- [18] Solarturm mit zweiachsiger Nachführung. <https://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/archiv-2015/2015/kw12/photovoltaik-innovation-franzoesischer-modulhersteller-edf-enr-kuendigt-blumenfoermigen-solar-generator-an.html>. Zugegriffen: 30. Oktober 2017
- [19] Sonderleittner R (2014) Solar Tracking optimiert die Ausbeute von Photovoltaikanlagen um knapp 50 Prozent. <https://www.fluid.de/faszination-fluid/solar-tracking-optimiert-die-ausbeute-von-photovoltaikanlagen-um-knapp-50-prozent-102.html>. Zugegriffen: 06. Mai 2021

