

Beratung  
Planung  
Ausführung  
Service



Cavertitzer Elektromontage GmbH, Auf dem Berg 3, 04758 Cavertitz/ OT Schirmeritz

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Dieses Vorhaben wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZZ0309B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Schlussbericht smart<sup>skin</sup>real

Stelzmann, Mario: Institut für Betonbau, HTWK Leipzig

Schreier, Markus: ABS Storkow GmbH

Navarro de Sosa, Inaki: Ingpuls GmbH

Schurig, Matthias: Betonwerk Oschatz GmbH

Syga, Kai: Cavertitzer Elektromontage GmbH

Nemati, Amir: Fraunhofer IWU, TU Chemnitz

Forschungsvorhaben:

**03ZZ1042K**

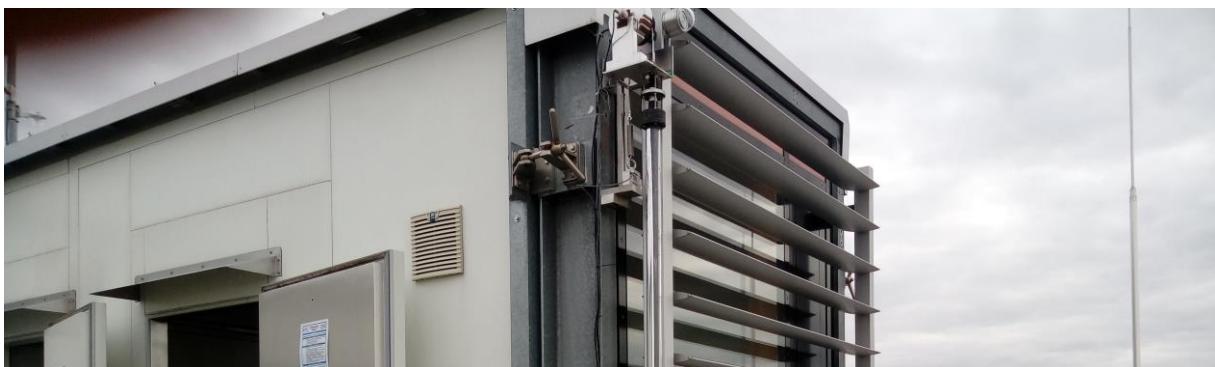
Zwanzig20 – smart<sup>3</sup> - Verbundvorhaben – SmartSkinReal – Entwicklung und Monitoring eines Verschattungssystems mit FGL-Steuerung; TP5: Entwicklung der Bedarfssteuerung

Ausführende Stelle:

**Cavertitzer Elektromontage GmbH, Auf dem Berg 3, 04758 Cavertitz**

Projektleiter:

**Herr Kai Syga**



## **Inhaltsverzeichnis**

- I. Kurze Darstellung3
  - II.1 Aufgabenstellung3
  - II.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde3
  - II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens3
  - II.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand3
  - II.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen4
- II. Eingehende Darstellung5
  - II.1 Verwendung der Zuwendung im Einzelnen und erzielte Resultate5
  - II.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises42
  - II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit43
  - II.4 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens43
  - II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen44
  - II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse45

# I. Kurze Darstellung

## II.1 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsvorhabens smart<sup>skin</sup>real war die anwendungsspezifische Entwicklung von autarken Verschattungssystemen und deren Komponenten für Neubau- und Bestandsgebäude. Es sollte ein komplettes, autarkes Verschattungssystem mit einer autark betriebenen Bedarfssteuerung entwickelt und validiert werden. Ferner sollte dafür ein autarker FGL-Antrieb (basierend auf thermischen Formgedächtnislegierungen) zur Aus- und Umrüstung ineffizienter Verschattungssysteme erforscht und entwickelt werden. Außerdem sollen die rechnerische Auslegung sowie Fertigungs- und Einbauprozesse für die Technologie entwickelt und validiert werden.

## II.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Effizienzsteigerung von Gebäuden ist ein wichtiger Aspekt der Energiewende. Dies bezieht sich auf Heizkosten, aber vor allem auf Kühlenergie im Winter. Öffentliche Gebäude mit großen Fensterflächen benötigen viel Energie für Kühlzwecke. Effiziente Verschattung kann die solare Aufheizung reduzieren und den Kühlenergiebedarf um bis zu 75% senken. Außenliegende Systeme bieten die höchste Einsparung, aber haben hohe Kosten und sind oft nur fassaden- oder gebäudeweit einsetzbar. Das Vorgängerprojekt smart<sup>skin</sup> hatte die Machbarkeit eines energieautarken, wartungsarmen, klimaangepassten und raumweise agierenden Sonnenschutzprinzips untersucht. Basierend dem entstandenen Kleindemonstrator sollten in diesem Forschungsvorhaben smart<sup>skin</sup>real Großdemonstratoren im 1:1 Maßstab entwickelt und validiert werden.

## II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Durchführung des Forschungsvorhabens erfolgte gemeinsam mit den am Gesamtvorhaben beteiligten Projektbeteiligten HTWK Leipzig (Verbundkoordination), ABS Storkow GmbH, IngPuls GmbH, Betonwerk Oschatz GmbH, Cavertitzer Elektromontagen GmbH und TU Chemnitz.

Der Ablauf des Vorhabens war in sechs Arbeitspakete (AP) untergliedert, an denen jeweils alle Projektbeteiligten beteiligt waren. Thematisch teilen sich die Arbeitspakete in Aufgaben zur Technologieentwicklung (T1 – T3) und in die Entwicklung des Konfigurationstools (K1-K3).

Tabelle 1: Arbeitspakete und Arbeitsschritte im Vorhaben smart<sup>skin</sup>real

ARBEITSPAKET	BEZEICHNUNG
T1	Anwendungsspezifische Konzeptentwicklung
T2	Objektspezifische Anpassung / Herstell- und Monitoringkonzept
T3	Demonstratorerstellung / Monitoring / Validierung
K1	Anforderungsprofil / Konzeptentwicklung
K2	Algorithmenerstellung
K3	Algorithmenvalidierung, -weiterentwicklung und -programmierung

## II.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

Um moderne, energieeffiziente Gebäude zu errichten, ist eine gründliche Planung erforderlich, die eine Reduzierung des Energieeinsatzes in allen Bereichen berücksichtigt. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Fassadenplanung, insbesondere der Sonnenschutz. Ein gut geplantes Sonnenschutzsystem kann den übermäßigen Wärmeeintrag und Blendung vermeiden, ohne dabei die Tageslichtversorgung oder den Kontakt zur Außenwelt zu beeinträchtigen. Es gibt eine Vielzahl von Sonnenschutzsystemen am Markt, die sich nach ihrer Funktionalität und Lage unterscheiden.

- Innenliegende Systeme haben eine geringere Sonnenschutzwirkung, während

- außenliegende Systeme mittlere bis hohe Sonnenschutzwirkung haben. In einer zweiten Unterkategorie unterscheiden sich diese in
- dynamische Systeme, die auf die Umwelteinflüsse reagieren können,
- statische Systeme, die nicht beweglich sind, aber eine geringere Sonnenschutzwirkung haben und
- Permanente Systeme die dauerhaft installiert werden und lediglich eine mittlere Sonnenschutzwirkung bieten.

Wichtig ist, dass das gewählte System an die Bedürfnisse und Anforderungen angepasst wird, um eine optimale Energieeffizienz zu gewährleisten.

Im Vorgängerprojekt smart<sup>skin</sup> sind verschiedene Strategien zur Umsetzung von Mechanismen für die Anwendung des Formgedächtniseffektes als Sonnenschutz entwickelt und untersucht worden. Der hier entwickelte Kleindemonstrator bildete die Basis für das Forschungsvorhaben smart<sup>skin</sup>real.

## II.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es bestanden vielfältige Kontakte zum smart<sup>3</sup>-Strategieteam und den weiteren Partnern des smart<sup>3</sup>-Projekts.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1 Verwendung der Zuwendung im Einzelnen und erzielte Resultate**

#### **II.1.1 Arbeitspaket T1: Anwendungsspezifische Konzeptentwicklung**

Die Konzeptentwicklung erfolgte zu Beginn des Projekts in einem iterativen Prozess. Dabei sind Arbeitstreffen (zunächst in Präsenz, später vorrangig digital) mit allen sechs Partnern durchgeführt worden. Das Ziel der Treffen bestand darin, Strategien für die Umsetzung des Projekts zu entwickeln. In den ersten Treffen wurde das Vorgängerprojekt besprochen und alle Partner konnten ihre Ideen, Problemstellungen und Lösungsansätze für ihre jeweilige Fachkompetenz einbringen. Für die Zeit zwischen den Arbeitstreffen wurden Arbeitsaufgaben für die jeweiligen Partner definiert, um Recherchen, Vorversuche und Simulationen durchzuführen. Durch diesen iterativen Prozess konnten nach und nach Probleme identifiziert und Ansätze/ Konzepte entwickelt werden. Am Ende des Arbeitspakets entstand ein Konzept, um ein Sonnenschutzsystem auf Basis der FGL-Technologie im 1:1-Maßstab umzusetzen.

Basierend auf dem im Vorgängerprojekt entwickelten grundlegenden FGL-Mechanismus hat sich das Projektteam auf das Sonnenschutzsystem Solarfin des Herstellers Colt International GmbH verständigt. Die technischen Vorteile überwiegen hier deutlich gegenüber anderen Sonnenschutzsystemen.



Abbildung 1: Sonnenschutzsystem Solarfin des Herstellers Colt International GmbH<sup>1</sup>

Das zu entwickelnde Sonnenschutzsystem sollte verschiedene nutzerspezifische Anforderungen und diverse technische Funktionen erfüllen. Basierend auf Anforderungen bestehender Systeme sind die folgenden abgeleitet worden:

- Einstellbare Lamellen für variable Sonnenschutzwirkung in den Winkelstellungen 0°, 45° und 90° sowie weitere Winkelstellungen falls möglich (ABS),
- Rastmechanismus für das Halten von div. Winkelstellungen (CAV),
- Steuerung der Lamellenpositionen durch Nutzerbedarfsteuerung (ABS, HTWK),
- Energieautarkie des Gesamtsystems (BWO),

---

<sup>1</sup> Quelle: Colt International GmbH (2023) [www.colt-info.de/](http://www.colt-info.de/) [online] abgerufen am 17.02.2023 <https://www.colt-info.de/seemaxx-sonnenschutz-brandschutz-einkaufszentrum.html>

- Automatische Reaktion auf veränderliche Sonnenpositionen und Intensität der Sonneneinstrahlung (HTWK),
- Optionale elektrische Steuerung des Verschattungssystems (elektrische Erwärmung des FGL-Drahts) (CAV)
- Wechsel zwischen Solar- und elektrischem Betriebsmodus (CAV)
- Materialien und Verarbeitung für den Einsatz im Außenbereich ausgelegt (ABS),
- Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse wie Regen, Wind, Schnee und UV-Strahlung (ABS),
- Brandhemmende Materialien und Funktionen, um Brände zu verhindern oder zu begrenzen (ABS, BWO),
- Automatisches Notabschaltungssystem für den Fall von Gefahrensituationen (z.B. Brandschutzstellung der Lamellen) (ABS, BWO),
- Möglichkeit zur Fernsteuerung und Überwachung (CAV),
- Einfache Reinigung und Wartung der Lamellen (Reinigungsstellung der Lamellen) (ABS, BWO),
- Geringe Geräuschentwicklung während des Betriebs (ABS),
- Kompatibilität mit anderen Systemen und Gebäudetechnologien wie Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen (CAV),
- Nutzung für neue Sonnenschutzsysteme und Verwendung als Sanierungslösung in Bestandsanlagen (ABS, BWO),
- Bauliche Integration der Steuerkomponenten bei Neubau und Sanierung (ABS, BWO),
- Integration der Steuerkomponenten in Hausautomationssysteme (CAV),
- Geringer Platzbedarf für die serielle Anordnung der Sonnenschutzsysteme nebeneinander (TUC),
- Gewährleistung der dauerhaften Funktionstauglichkeit durch Verwendung von FGL-Technologie mit  $> 10^6$  Schaltzyklen (IngP),
- Schutz des FGL-Materials gegen Witterungseinflüsse (IngP, CAV).

Der Entwicklungsstand des Sonnenschutzsystems steht zu diesem Zeitpunkt erst am Anfang. Die gesetzten Anforderungen können und werden sich im Laufe der Projektbearbeitung weiter verändern.

Das aus den gegebenen Anforderungen resultierende Konzept sieht einen Externen Aktor vor, der seitlich an das Verschattungssystem montiert werden soll. Die ursprünglich angedachte direkte Integration in die Aluminiumprofile des Verschattungssystems schien aus Sicht der Projektpartner als unrealistisch. Denn im Rahmen dieses Arbeitspaketes zeigten sich zahlreiche technische Schwierigkeiten, die einen hochflexiblen Aktor erfordern um möglichst mit geringem Aufwand verschiedene Aktor-Versionen zu erzeugen und zu testen (TUC).

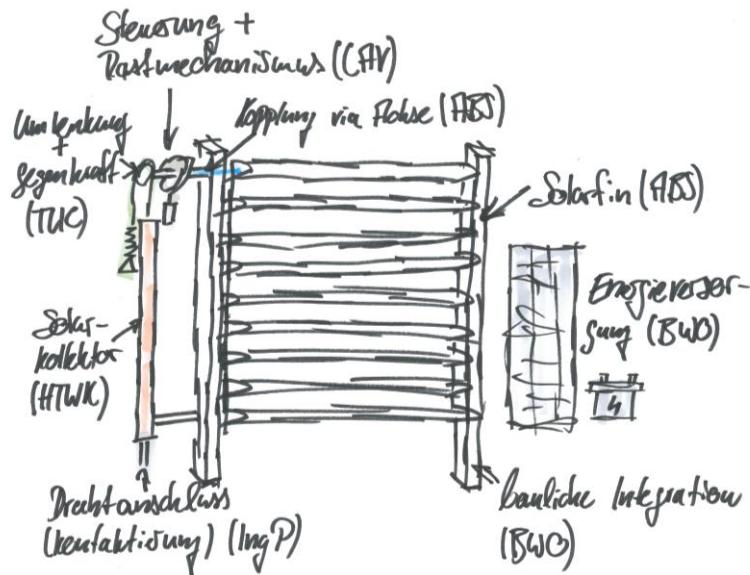


Abbildung 2: Konzept für die Realisierung von SmartSkinReal und die Definition von Zuständigkeiten der Projektpartner

## II.1.2 Arbeitspaket T2: Objektspezifische Anpassung / Herstell- und Monitoringkonzept

Basierend auf denen im Arbeitspaket T1 definierten Anforderungen sind zunächst verschiedene Untersuchungen zu Teilespekten durch die Projektpartner durchgeführt worden. Deren Ziel war die Umsetzung der definierten Anforderungen.

Dass zu entwickelnde Sonnenschutzsystems lässt sich dabei in verschiedene Einzelkomponenten je nach Projektpartner aufteilen. So haben sich die Arbeiten im Arbeitspaket T2 bei den Projektpartnern auf die Lösung von je fachspezifischer Frage- und Problemstellungen im jeweiligen Kompetenzbereich fokussiert. Während der Bearbeitung wurden die Ergebnisse je allen beteiligten Präsentiert und diskutiert. In einen iterativen Entwicklungsprozess konnten so ggf. auftretenden Problemstellungen in Besprechungen vorgegriffen werden.

### Arbeitspunkt T2.1 (HTWK) Bauphys. Simulationen (Gebäudeenergiebilanz/Behaglichkeit) mit Festlegung Schalt-temperaturen; Entwicklung Monitoringkonzept (Energiebilanz/Behaglichkeit)

In einer Voruntersuchung wurden verschiedene Kombinationen von Materialien und Größen für den Kollektor aufgebaut und im Außenklima untersucht. Die folgende Abbildung 3 zeigt eine Übersicht der Varianten. Die Kollektorröhren haben eine Höhe von je 1 m und je Enden wurden luftdicht ausgeführt. Jede Variante wurde je im Zentrum und ggf. im Kollektorzwischenraum mit Temperatursensoren ausgestattet. Verschiedene Sensoren erfassen die Außenklimatischen Randbedingungen wie Außenlufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und die auf die Kollektoren gerichtete Solarstrahlung (siehe Abbildung 3). Bei PMMA Rohren erfolgte teilweise eine rückseitige Verspiegelung mit Alufolie. Die Alurohre wurden schwarz lackiert. Der in Abbildung 4 links zu sehende fertige Versuchsstand befindet sich nach Süden ausgerichtet auf dem Dach des Laborgebäudes der HTWK Leipzig. Mit einer Messwertausgabe im 10-Minuten-Intervall sind Daten von Anfang März 2020 bis Mitte Juni 2020 über 100 Tage verfügbar.

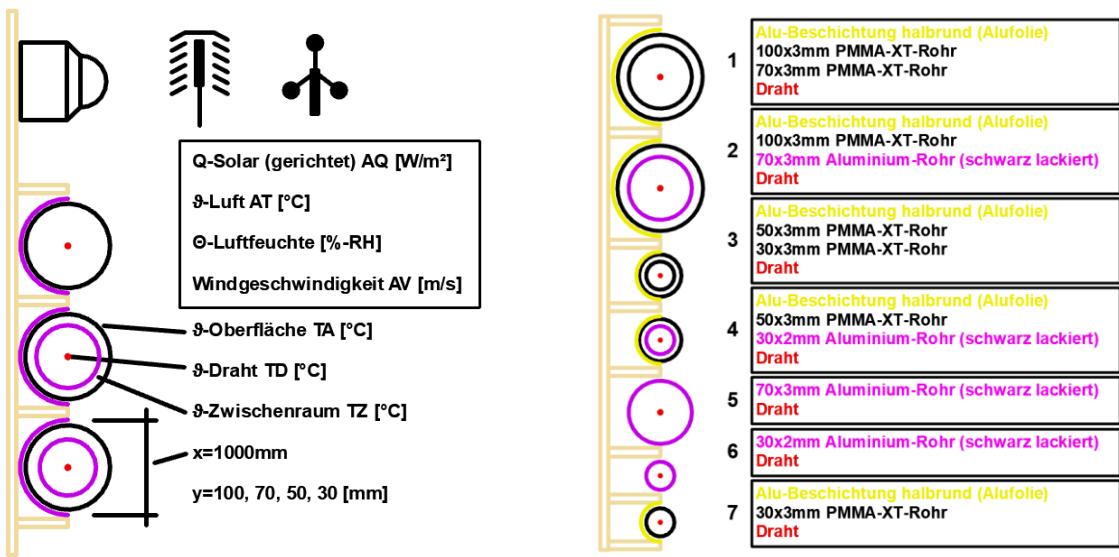


Abbildung 3: Skizzen des Messkonzepts (links) und der Untersuchungsvarianten 1...7 (rechts)

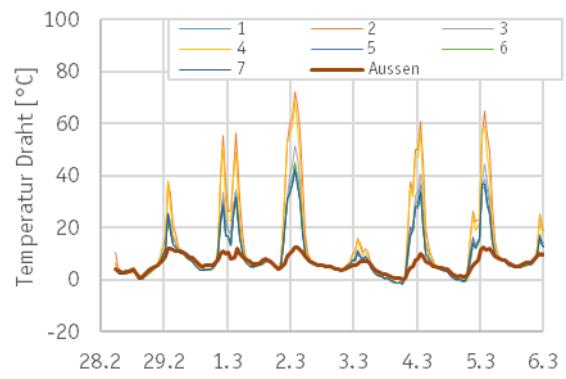


Abbildung 4: Fotos des Versuchsaufbaus (links) und Messergebnisse der verschiedenen Varianten gegenübergestellt mit der Außenlufttemperatur (rechts)

Die Messdaten der verschiedenen Varianten zeigen ein heterogenes Bild (vgl. Abbildung 4 rechts). So erreichten Drähte in einem einfachen Aluminium- oder PMMA-Rohr Tageshöchst-Temperaturen von 40 °C bis 50 °C. Von allen untersuchten Varianten stechen die Rohr-in-Rohr Lösungen Aluminium in PMMA hervor (Varianten 2 und 4). Die beiden verschiedenen untersuchten Kollektordurchmesser zeigen ein ähnliches Verhalten bei der resultierenden Drahttemperatur. Hier wurden Tageshöchst-Temperaturen von 60 °C bis 75 °C erreicht.

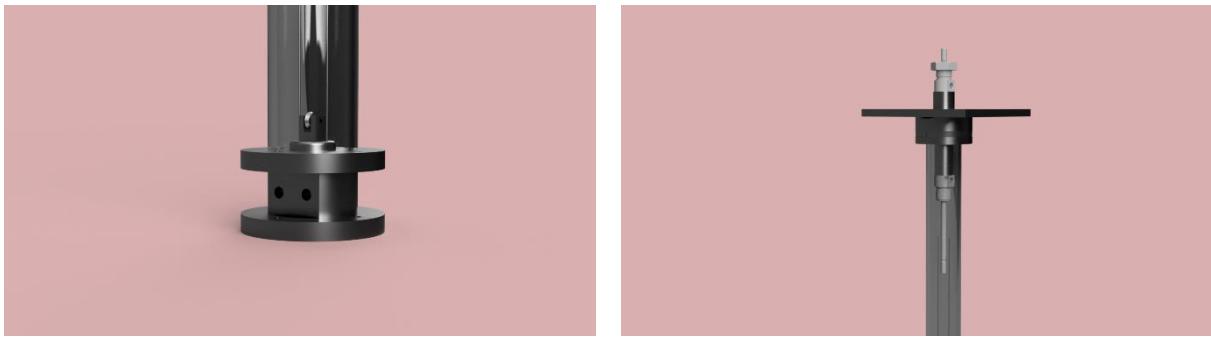


Abbildung 5: 3D-Modell der Anschlusspunkte des Solarkollektors

### **Arbeitspunkt T2.2 (ABS) Verschattungsseitige Konstruktionsentwicklung für Realobjekte mit Aktoranbindung; Validierung und Optimierung hinsichtlich Praxistauglichkeit und Fertigung; Herstellkonzept**

Es wurden spezifische Konstruktionsdetails des Standard-Verschattungssystems für die beiden gewählten Einsatzorte Leipzig und Chemnitz und in Bezug auf die Vorzugsvariante erstellt. Dabei wurden auch Anpassungen an die gewählten Vorzugsvarianten seitens IngPuls und TUC vorgenommen, um den jeweiligen Aktor zu erstellen. Eine wesentliche Änderung betrifft, dass das Verschattungssystem nun nicht durch einen linearantrieb, sondern durch eine Drehbewegung angesteuert wird. Anpassungen von konstruktiven Details wurden daher vorgenommen, um die Praxistauglichkeit und industrielle Fertigung sicherzustellen. Zusätzlich wurde eine Abstimmung mit BWO durchgeführt, um die generelle Passung des Verschattungssystems mit den seitens BWO gewählten Fassadensystemen sicherzustellen. Im Anschluss wurden Fertigungskonzepte erstellt, die es erlauben, die neuen Systeme in den vorhandenen Herstellprozess einzubinden.

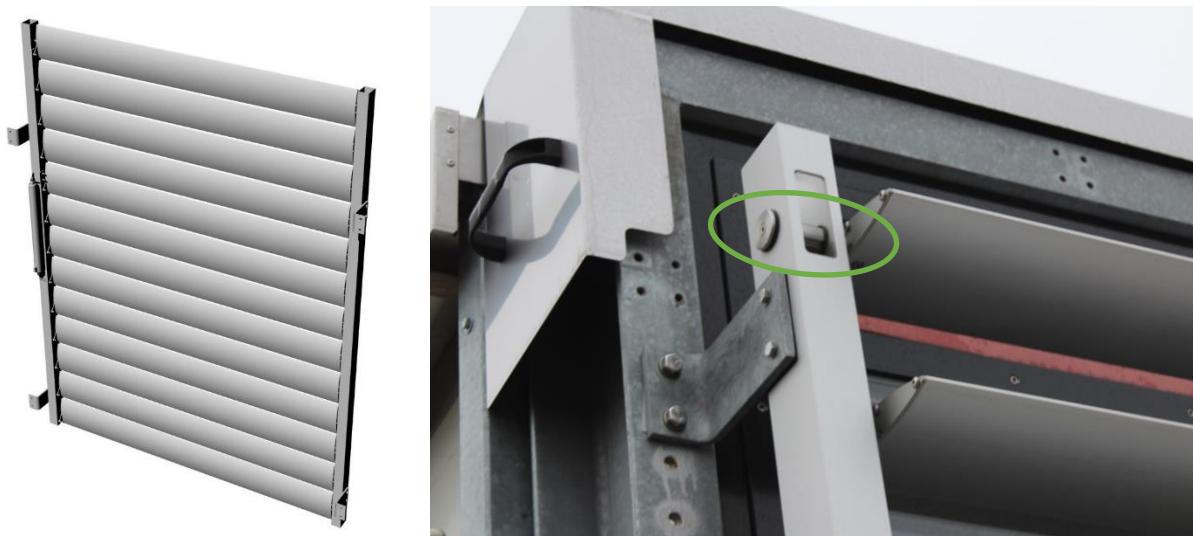


Abbildung 6: 3D-Modell des verwendeten Verschattungssystems (links), modifizierter Antrieb des Verschattungssystems über eine Welle (rechts)

### **Arbeitspunkt T2.3 (IngP) Produktion/Konfiguration/Charakterisierung Aktordrähte entspr. T2.1; Entwicklung elektromechanische Kontaktierung; Vorbereitung Aktordrähte für Einbau**

Es wurde exemplarisches FGL-Material produziert und konfektioniert, welches die Anforderungen aus T2.1 möglichst gut erfüllte, s. Abbildung 7.



Abbildung 7: Verschiedene FGL-Drähte mit verschiedenen Eigenschaften .

Hierfür waren eine Legierungsanpassung sowie eine elektromechanische Kontaktierung erforderlich. Es wurde ein Legierungsscreening durchgeführt und das FGL-Material basischarakterisiert. Im Anschluss wurde eine Prozesskettenentwicklung zur Produktion des Materials durchgeführt und die Zielparameter eingestellt. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Charakterisierung der Umwandlungstemperaturen. (PUT) des Aktormaterials im lastfreien Zustand mittels Differenzkalorimetrie. Wichtig ist hier die Lage der Phasenumwandlungstemperaturen, die so gewählt sind, dass oberhalb von Raumtemperatur eine vollständige Rückumwandlung stattfindet. Die PUT dürfen jedoch nicht so hoch liegen, dass sie durch die Sonneneinstrahlung im Kollektor nicht erreicht werden können.

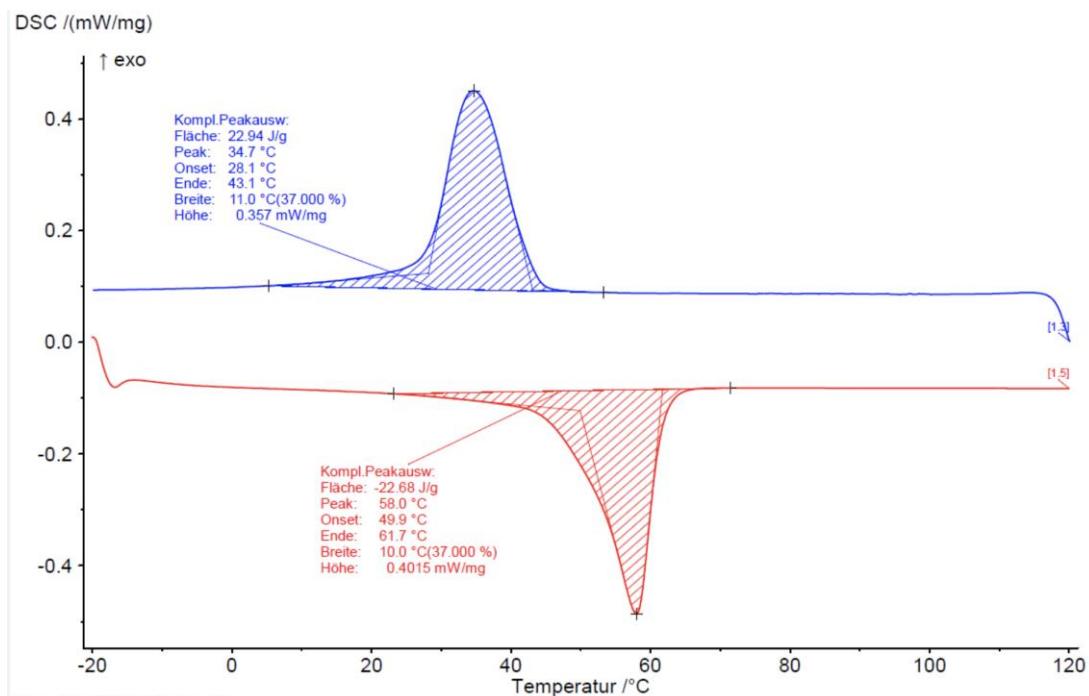


Abbildung 8: Umwandlungstemperaturen im lastfreien Zustand einer angepassten, quaternären FGL.

Für die erste Iteration wurde ein Zieldurchmesser von 0,76mm gewählt, dieser Draht kann bei einer Umwandlungsspannung von 450 MPa im Einzelstrang eine Kraft von ca. 200 N, als Doppel-Draht/Schlaufe entsprechend 400 N erzeugen, bei einer nutzbaren Dehnung von ca. 5%, s.



Abbildung 9: Spannungs-Dehnungskurven der FGL im martensitischen (rot) und austenitischen (grün) Zustand.

#### **Arbeitspunkt T2.4 (BW0) Anpassung Systemintegrationskonzept für Realobjekte; Validierung/Optimierung von gebäudeseitigen Details und entsprechender Funktionsmuster; objektspezifische Konstruktionsdetails**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde das Systemintegrationskonzept für Realobjekte angepasst und gebäudeseitige Details sowie entsprechende Funktionsmuster validiert und optimiert. Es wurden objektspezifische Konstruktionsdetails erarbeitet und Versorgungsfunktionsmuster auf Basis der

Steuerungsfunktionsmuster getestet. Im Labormaßstab wurden Vorzugsvarianten der Versorgungstechnik hergestellt und an die Funktionsmuster des Partners HTWK gekoppelt, um die Kompatibilität zu validieren. Betriebskenngrößen im Labormaßstab wurden unter gekoppelten Bedingungen ermittelt und Abhängigkeiten untereinander dokumentiert. Die bautechnische Umsetzung der Ankopplung des Gesamtsystems an die Realgebäude wurde im Detail geplant und umsetzungsbereit gemacht. Für die bautechnische Integration des entwickelten Verschattungssystems wurde auf das eigene SysPro-Doppelwand-System aus Stahl- oder Carbonbeton (Thermowand) angewendet. Die Versorgungseinheit ließe sich über ein separates Photovoltaik-Modul oder über eine zentrale Photovoltaikanlage (z.B. auf dem Dach des Gebäudes) speisen.

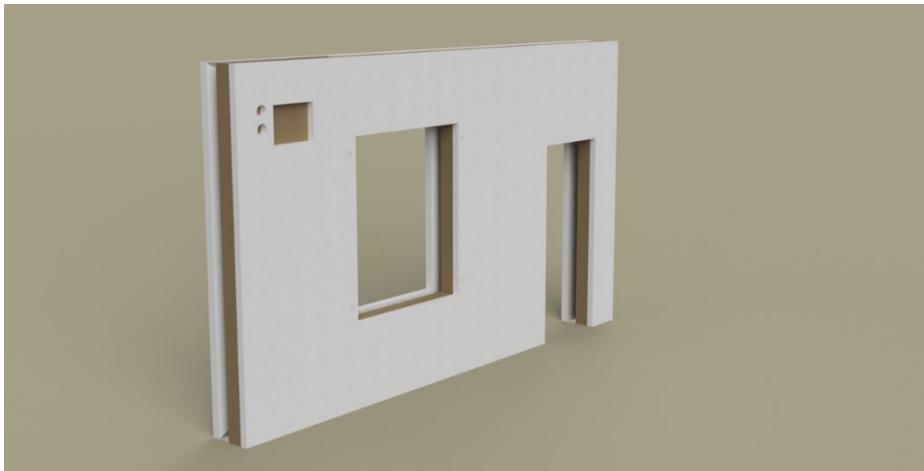


Abbildung 10: 3D-Modell einer Beton-Doppelwand mit Wärmedämmung und integrierten Befestigungspunkten und Systemintegration zur energieautarken Versorgung

#### **Arbeitspunkt T2.5 (CAV) Auslegung Steuerung für Einsatzorte basierend auf restlichen Systemkomponenten; Erstellung/Validierung/Optimierung Funktionsmodelle; Herstellkonzept Steuerung**

Im Zuge des Arbeitspakets wurden sowohl die elektronischen Anforderungen als auch die konstruktiven Möglichkeiten zum Einbau berücksichtigt. Die Steuerungen wurden entsprechend geplant und Funktionsmodelle gefertigt, welche unter Nutzung der Funktionsmuster der anderen Partner getestet und angepasst wurden. Im Kleinmaßstab sind hier zunächst verschiedene Komponenten entwickelt, gefertigt und erprobt worden. Ziel der Untersuchungen war die Identifizierung von möglichen Lösungen zur Steuerung des FGL-Aktors. Das Ergebnis ist eine validierte Steuerungskonstruktion, welche auch eine perspektivische Serienfertigung erlaubt. Einzelne Komponenten sind direkt in die Konstruktion des Aktors eingeflossen.

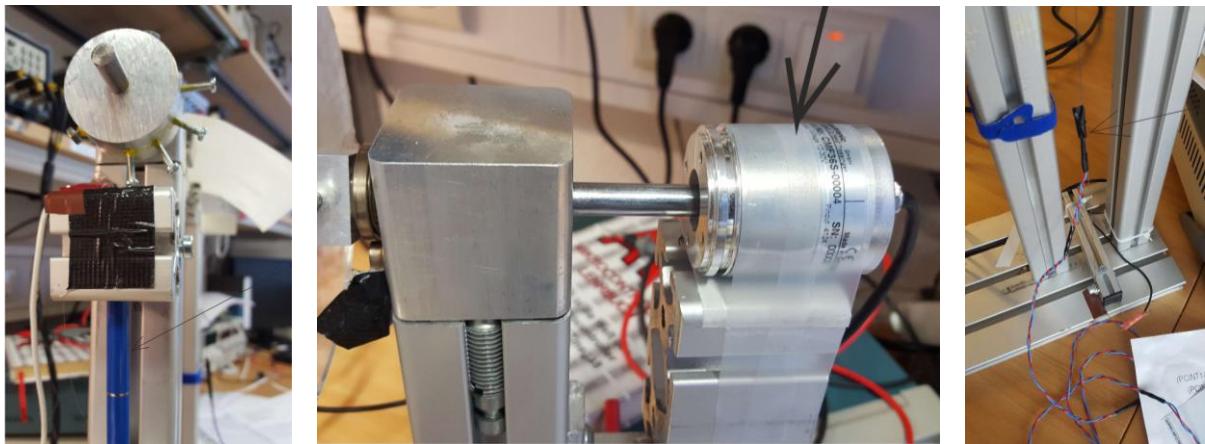


Abbildung 11: Details des elektrotechnischen Kleindemonstrators zur Erprobung von Rastmechanismen (links), Winkelsensorik (mittig) und Erfassung von Drahttemperaturen (rechts)

### **Arbeitspunkt T2.6 (TUC) Validierung/Optimierung Aktorfunktionsmuster; Herstellungs- und Integrationskonzept bezüglich Verschattungsfertigung; Monitoringkonzept (Materialverhalten FGL)**

Im Rahmen von AP T2.6 wurden verschiedene Lösungen für die Konstruktion eines Aktors theoretisch entwickelt. Die Partner haben gemeinsam Lösungsvarianten für verschiedene Problemstellungen erarbeitet und diskutiert. Der Aktor wurde als Herzstück des Systems betrachtet, wobei alle Partner Einfluss nehmen konnten. Eine Herausforderung war es, dass verschiedene Lösungen bzw. deren Kombinationen teilweise neue Problemstellungen zur Folge hatten. Gleichzeitig sollte der Aktor jedoch so konstruiert sein, dass verschiedene Lösungen ausprobiert und die Konstruktion möglichst flexibel gestaltet werden konnte.

Im Verlauf des APs führte dieser iterative Prozess zu zahlreichen Änderungen im Aufbau und in der Modellbildung, um eine erste Version des Aktors zu konstruieren. Die Partner haben sich intensiv mit der Entwicklung, Bewertung und Optimierung der FGL-Aktortechnologie auseinandergesetzt, indem sie die Funktionsmuster von AP T1 validierten. Das Herstellungs- und Integrationskonzept für das Sonnenschutzsystem wurde ebenfalls entwickelt und optimiert. Zusätzlich wurde ein Monitoringkonzept für die FGL-Aktorsysteme entwickelt, um das Funktions- und Materialverhalten im Betrieb zu überwachen.

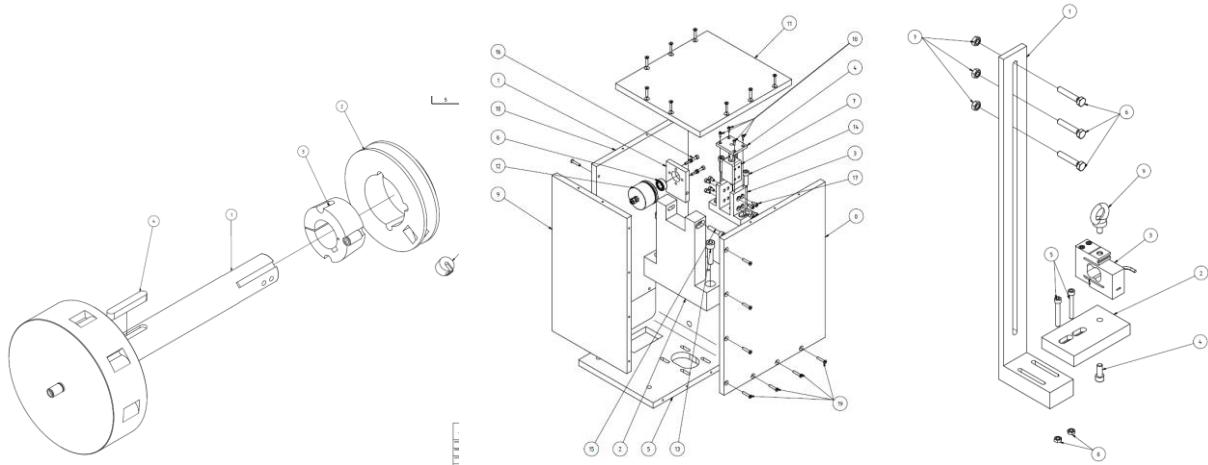


Abbildung 12: 3D-Konstruktionsdaten des entwickelten Aktors

### II.1.3 Arbeitspaket T3: Demonstratorerstellung / Monitoring / Validierung

Auf Basis der in Arbeitspaket T2 entwickelten Teildemonstratoren wurden verschiedene Varianten an Aktoren im Maßstab 1:1 konstruiert, gefertigt und montiert. Die bestehenden Fassadenkonstruktionen wurden z.T. modifiziert und die Standardkomponenten der Mechanik der Solarfin-Verschattungseinheiten wurden angepasst. Besondere Herausforderungen lagen hier in der technischen Verknüpfung der einzelnen Lösungen. An den Standorten Leipzig und Chemnitz sind insgesamt drei Großdemonstratoren identischer Größe mit je z.T. verschiedenen Ausrichtungen und Konstruktionsvarianten vom Typ Solarfin aufgebaut worden. Die beiden in Leipzig montierten Großdemonstratoren verschatten die Fensterfläche von zwei identisch aufgebauten klimagesteuerten Raumzellen. Darunter wurde auch ein Verschattungssystem in der industriellen Standardausführung als Referenz mit einem elektrischen Linearantrieb (entsprechend der Standardausführung) und Steuerautomation mit eigener Wetterstation montiert. Die entwickelten Lösungen mit FGL-Aktoren zeigen verschiedene Flexibilitäten hinsichtlich der Erprobung verschiedener Varianten. So sind die Konstruktionsteile überwiegend mit Langlöchern und auswechselbaren Standardkomponenten ausgerüstet. Für die Untersuchung von relevanten Parametern in einem Kurz- und Langzeitmonitoring sind verschiedene Sensoren in den Aufbau integriert worden. Kontinuierlich gemessen werden dabei:

- Temperatur im Solarkollektor (in etwa FGL-Temperatur im Solarbetrieb)
- Außenklima (Temperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck)
- Gerichtete Solarstrahlung (um 90° in Ausrichtung des Sonnenschutzsystems)
- Winkelneigung des Sonnenschutzsystems
- Mechanische Spannung des FGL-Drahts
- Elektrischer Stromverbrauch des Sonnenschutzes mit FGL-Antrieb (bei Erwärmung des FGL-Drahts durch Strom)
- Elektrischer Stromverbrauch des Sonnenschutzes mit Linearmotor-Antrieb (Referenz)

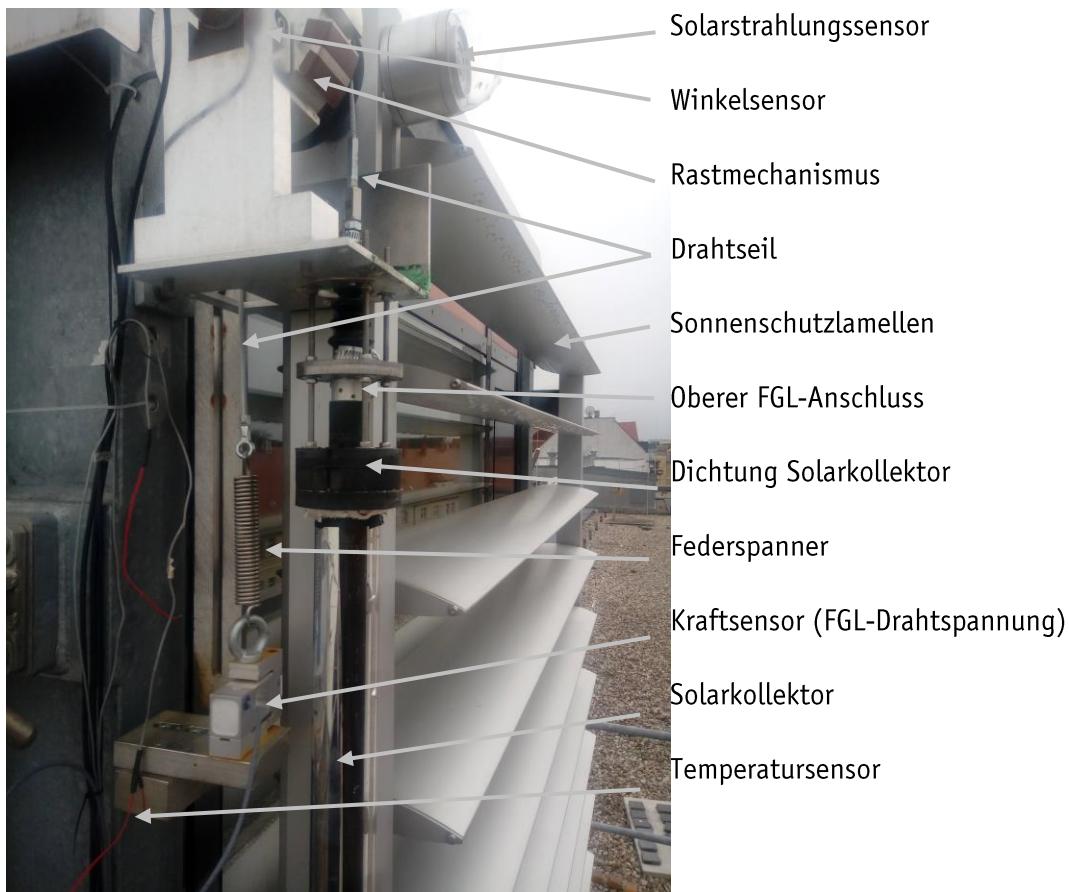


Abbildung 13: Darstellung des wesentlichen Komponenten des FGL-Aktors zum Antrieb des Sonnenschutzesystems (der FGL-Draht befindet sich geschützt und thermisch gekapselt innerhalb des Solarkollektors)

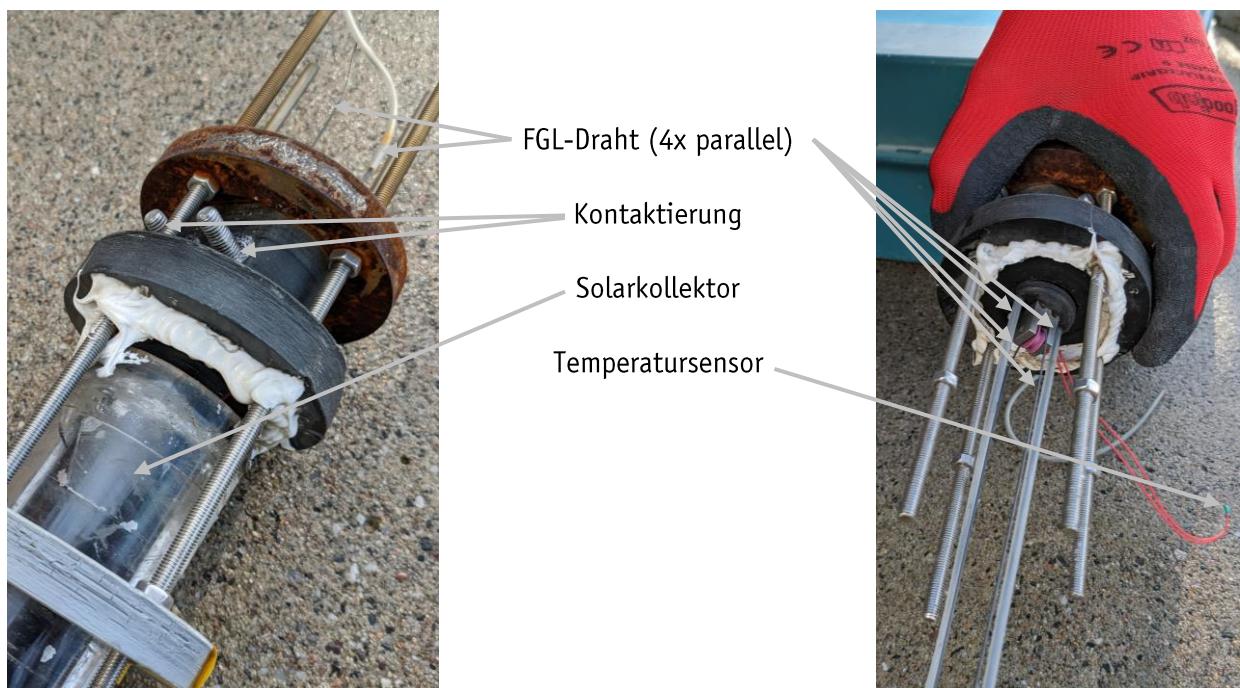


Abbildung 14: Komponenten des Fußpunktes des Solarkollektors mit FGL-Drahtumlenkung und elektr. Anschluss in Kunststoffbauteil

## **Arbeitspunkt T3.1 (HTWK) Einbau Systeme (mit ABS); bauphys.-baukonstr. Monitoring/ Validierungsprüfungen; Analyse Optimierungspotentiale/Weiterentwicklung Technologie (Sicht Bauphysik); Energetische Vergleichsmessungen gegenüber konventionellem System**

Im Rahmen des Arbeitspakets T3.1 wurden die Großdemonstratoren mit den entwickelten Technologien hergestellt und eingebaut. Hierbei erfolgte eine Überwachung der bauphysikalischen Eigenschaften sowie die Installation der notwendigen Messtechnik. Anschließend wurden Lang- und Kurzzeitmessungen durchgeführt, wobei die HTWK die Demonstratoren auf ihre energetischen und behaglichkeitstechnischen Wirkungen hin untersuchte. Die gewonnenen Daten wurden im Vergleich mit denen konventioneller Technologien ausgewertet, um die Effektivität und Wirkungsweise der Neuentwicklungen zu validieren. Dabei zeigten die Ergebnisse, dass die Technologien mindestens gleichwertig zu konventionellen Systemen waren. Die elektrische Aktivierung des Verschattungssystems benötigt im Jahresdurchschnitt einen Strombedarf von 0,10 kWh/90° je Aktivierung. Das konventionelle System hat einen Strombedarf von ca. 0,94 kWh/90° Aktivierung. Unter Berücksichtigung des automatischen solaren Sommerbetriebs (Aktivierung via Solarkollektor) ließe sich der Strombedarf für die entwickelte Aktor-Antriebstechnologie voraussichtlich mehr als halbieren. Die Vergleichsmessungen erfolgten in der exakt gleichen Zeitperiode und unter den gleichen klimatischen Randbedingungen.

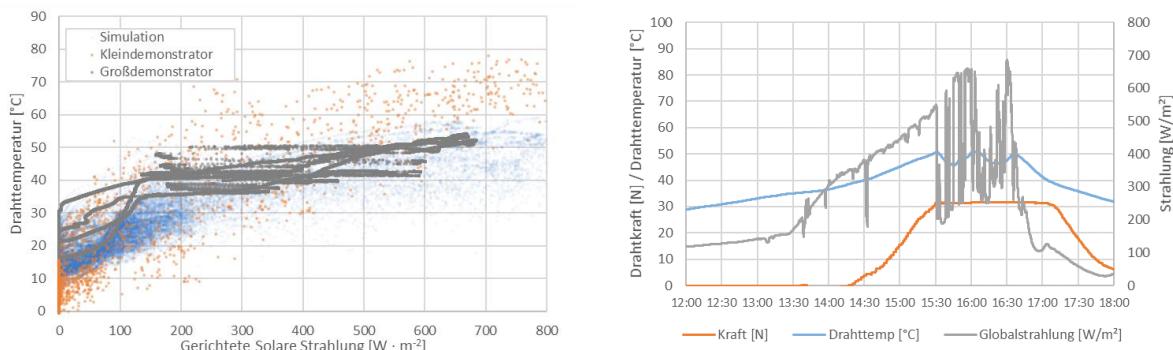


Abbildung 15: Darstellung von Messergebnissen des Monitorings mit Gegenüberstellung von Messdaten der Drahttemperatur im Solarbetrieb ggü. Simulationsergebnissen und ggü. Messdaten des Kleindemonstrators (links) sowie Monitoringdaten der Kraftentwicklung des FGL-Aktors mit Temperaturdaten des FGL-Drahts und Solarstrahlung an einem warmen Sommertag (rechts)

## **Arbeitspunkt T3.2 (ABS) Erstellung/Einbau Komplettsysteme; Analyse Optimierungspotentiale/ Weiterentwicklung Technologie (Sicht Gebrauchstauglichkeit, Herstellung, Systemmontage)**

Die entwickelten Aktorkonstruktionen wurden hergestellt und an den Standorten Leipzig und Chemnitz montiert. Es traten während der Fertigung und Montage der Aktorbauteile verschiedene Schwierigkeiten auf, die auf den Prototypenstatus und die Komplexität des Aktors zurückzuführen waren. Es mussten mehrere Versionen des Aktors hergestellt werden, da verschiedene Probleme erkannt wurden. Einige Bauteile mussten z.T. aufwändig umgearbeitet werden, und bei der Änderung von verschiedenen Lösungen wurden regelmäßig Änderungen am Aktor vorgenommen. Trotz dieser Schwierigkeiten konnten die Lösungen am Verschattungssystem selbst für das Projekt beibehalten werden.



Abbildung 16: An der HTWK Leipzig installierte Verschattungssysteme an Mess-Klimazellen links als Standardvariante mit Linearantrieb und rechts mit Änderungen zur Installation eines FGL-Antriebs

### **Arbeitspunkt T3.3 (IngP) Charakterisierung FGL-Drähte inkl. Entwicklung/Fertigung von Prüfvorrichtungen zur Ermittlung spez. auslegungsrelevanter Materialparameter; Erstellung Datenblätter (Materialzielparameter) zur Auslegung FGL-Aktorsysteme (TUC)**

Es wurde ein Prüfstand entwickelt und aufgebaut, um die lastabhängigen Temperaturen unter definierten thermischen und mechanischen Lasten zu erfassen, s.

Abbildung 17.

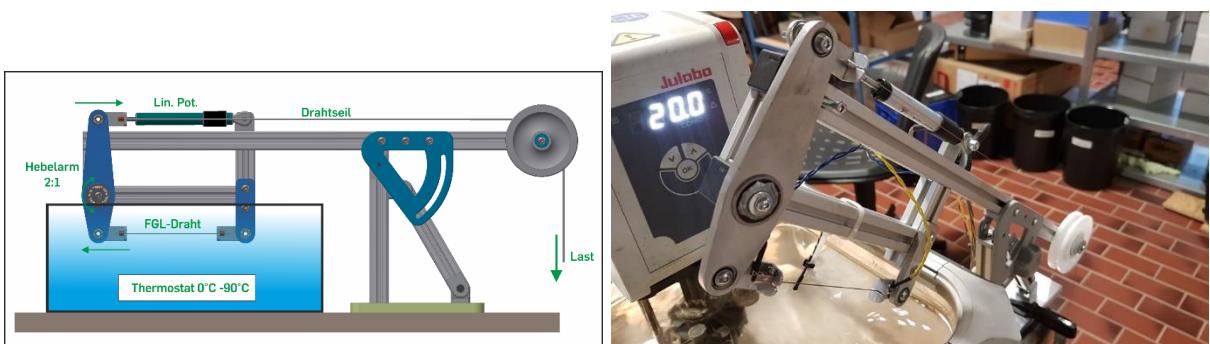


Abbildung 17: Schematische (links) und reale (rechts) Darstellung des Prüfstandes zur Ermittlung der Phasenumwandlungstemperaturen unter Last.

Messreihen wurden durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter auf die Aktoreigenschaften zu untersuchen, s. Abbildung 18. Die FGL-Drähte, die in den Demonstratoren verbaut waren, wurden auf mögliche Materialveränderungen während der Betriebszeit untersucht. Basierend auf den Ergebnissen wurden Maßnahmen zur Verbesserung der Legierung und Produktion abgeleitet.

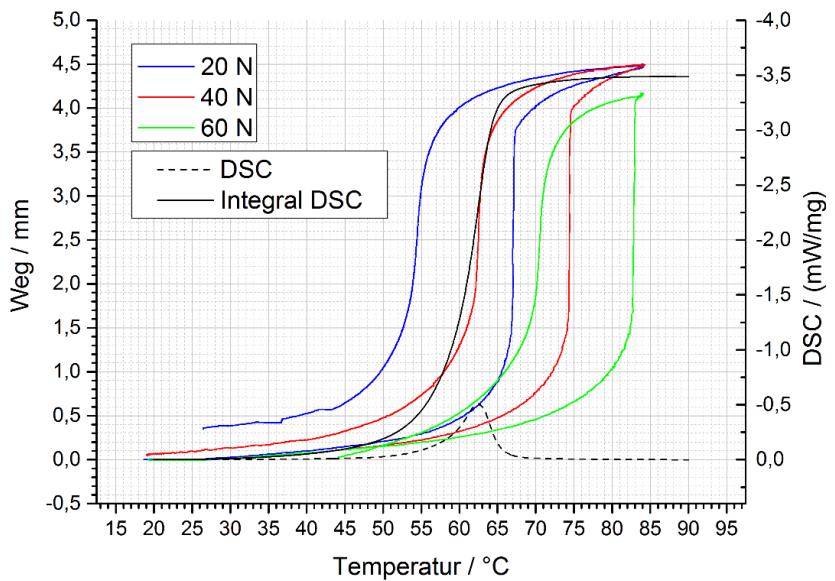


Abbildung 18. Exemplarische Messreihe zur Bestimmung der lastabhängigen Umwandlungstemperaturen.

### **Arbeitspunkt T3.5 (CAV) Fertigung/Einbau Bedarfssteuerung; Validierung/Analyse Optimierungspotentiale/, Weiterentwicklung Technologie (Sicht Steuerung) (Cavertitzer)**

Im Rahmen des Arbeitspakets T3.5 wurden die Großdemonstratoren mit den entwickelten Steuerungstechnologien ausgestattet und das notwendige Monitoring installiert. Es wurde ein Langzeitmonitoring an beiden Standorten durchgeführt, um die dauerhafte Einsatzfähigkeit der Steuerungen und das Zusammenspiel mit den anderen Komponenten unter Langzeiteinfluss zu untersuchen. Besonderes Augenmerk lag dabei auf dem Ansteuern der FGL-Drähte unter den verschiedenen klimatischen Einflüssen über das Jahr. Etwaige notwendige Variationen in Stromstärke und Bestromungsdauer wurden unter realen Einsatzbedingungen geprüft und bei Bedarf angepasst. Es zeigten sich große Unterschiede im Strombedarf in Abhängigkeit der Außentemperatur. Ursprüngliche Lösungsansätze die Position des Verschattungssystems in Abhängigkeit der angelegten Leistung zu positionieren musste aufgrund der Messergebnisse verworfen werden. Eine realisierte Lösung in einer späteren Variante lässt das Verschattungssystem durch Bestromung komplett schließen und rastet in der gewünschten Winkelposition (z.B. Lamellenverdrehung um 45°) im Bereich der Gegenkraft.

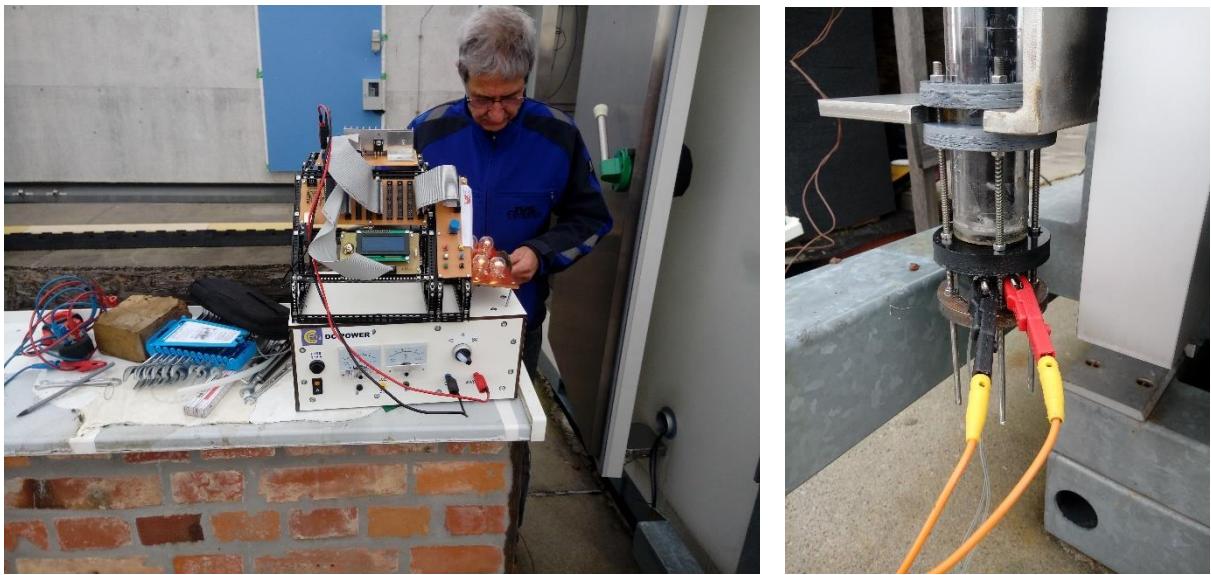


Abbildung 19: Elektrische Ansteuerung des FGL-Drahts mit entwickeltem Netzteil und Puls-Steuerung (links) sowie Kontaktierung der FGL-Drahtspitzen (rechts)

### **Arbeitspunkt T3.6 (TUC) Detaillierte Konstruktion/Fertigung/ Einbau Aktorkomponenten (mit Colt); materialspezifisches Monitoring/Validierungen/Analyse Optimierungspotentiale/Weiterentwicklung Technologie (Sicht FGL-Aktorsysteme)**

Im Rahmen des Arbeitspakets T3.6 wurden die FGL-Aktorsysteme für die Großdemonstratoren detailliert konstruiert, gefertigt und eingebaut. Hierbei erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit dem Unternehmen ABS.

Um eine umfassende Validierung der FGL-Aktorsysteme in realen Einsatzbedingungen zu gewährleisten, wurden verschiedene Nutzungsszenarien im Realklima untersucht. Während der Monitoringphase wurden sowohl das Funktions- als auch das Materialverhalten der Aktorsysteme getestet.

Durch die Analyse der Monitoringdaten konnten Optimierungspotentiale identifiziert werden, die im Rahmen der Weiterentwicklung der FGL-Aktortechnologie berücksichtigt wurden. Es wurden auch Anforderungen entwickelt, die sich aus dem weltweiten Einsatz der FGL-Aktorsysteme ergeben könnten.

Die umfassenden Validierungsversuche ermöglichen die Validierung der FGL-Aktorsysteme in realen Einsatzbedingungen und die Ableitung von Weiterentwicklungspotentialen.

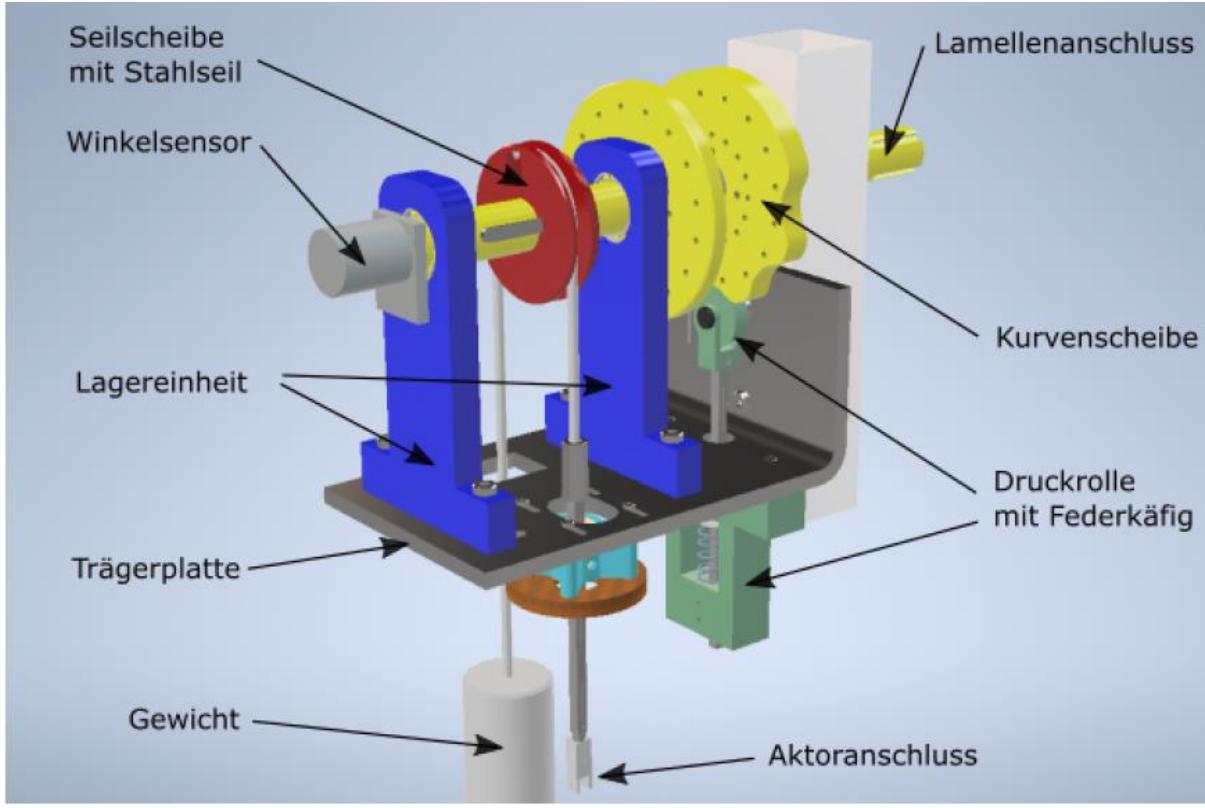


Abbildung 20: Finale Aktor-Version mit Profilscheibe in 0°, 45° und 90° Rastposition sowie Federmechanismus zur Realisierung von 45°-Positionierungen bei hohen Einstarahlungswerten als Foto (oben) und 3D-Zeichnung (unten)

## II.1.4 Arbeitspaket K1: Anforderungsprofil / Konzeptentwicklung

Im Rahmen des Arbeitspakets K1 wurden die Anforderungen an ein Gesamtauslegungstool erarbeitet, das von allen Unternehmenspartnern zur Auslegung ihrer Produkte genutzt werden soll. Dazu wurden die Funktionsweisen der derzeit verwendeten Tools analysiert und die notwendigen Anforderungen und Kriterien abgeleitet. Auf Basis dieser Anforderungen wurde ein Konzept entwickelt, das die Methodik und Struktur für die Erstellung der Ablaufschemata und Datenstrukturen festlegt. Dabei wurde berücksichtigt, dass auch zukünftig noch von den Forschungspartnern erarbeitete Daten in das System integriert werden können, um den späteren Übergang in die Verwertungsphase zu erleichtern.

Die Anforderungen wurden entsprechend der Kompetenzbereiche der Partner und der bisherigen Erkenntnisse und Festlegungen entwickelt. Anschließend wurde die Grobstruktur für die Konfigurationslösungen konzeptionell entwickelt. Durch die Erarbeitung von klaren Anforderungen und einem strukturierten Konzept soll eine effiziente Auslegung der Produkte der Unternehmenspartner ermöglicht werden.

Die Arbeitspakete K1-K3 beschreiben dabei insbesondere den theoretischen Hintergrund der Entwicklungsarbeiten im SmartSkinReal-Vorhaben. Diese Arbeitsschritte sind dann parametrisiert in ein Tool zu überführen. Das Ziel ein Verschattungssystem in einer Vorserienreife zu entwickeln konnte jedoch nicht vollumfänglich realisiert werden. Die finale Lösung der entwickelten Großdemonstratoren ließen sich vielmehr als vollfunktionstüchtige Prototypen beschreiben. Der dabei bewusst flexibel gestaltete Charakter der Akteure der Großdemonstratoren dient der Entwicklung, Erprobung und Optimierung der Tauglichkeit eines FGL-Angetriebenen Verschattungssystems. Die Fortentwicklung zu einem vorserienreifen Produkt mit wirtschaftlichem Material-, Fertigungs- und Montageeinsatz konnte im Rahmen von SmartSkinReal nicht umgesetzt werden.

### **Arbeitspunkt K1.1 (HTWK) Bauphys.-energetische sowie klimatische Anforderungen/Konzept; Beurteilung verwend- oder integrierbare bestehende Tools/Toolbestandteile (z. B. Gebäudesimulationsanwendungen)**

Nach DIN 4108-2 S.31<sup>2</sup> gilt für die Steuerung von Sonnenschutz:

*„Sind zur geplanten Betriebsweise einer Sonnenschutzvorrichtung keine Steuer- bzw. Regelparameter bekannt, so ist im Fall einer automatischen Sonnenschutzsteuerung für die Berechnungen von einer strahlungsabhängigen Steuerung für Nord-, Nordost- und Nordwestorientierte Fenster mit einer Grenzbestrahlungsstärke von 200 W/m<sup>2</sup> (Wohngebäude) bzw. 150 W/m<sup>2</sup> (Nichtwohngebäude) und für alle anderen Orientierungen mit einer Grenzbestrahlungsstärke von 300 W/m<sup>2</sup> (Wohngebäude) bzw. 200 W/m<sup>2</sup> (Nichtwohngebäude) (Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung, außen vor dem Fenster) pro Quadratmeter Fensterfläche auszugehen.“*

Dabei beschreibt die Grenzbestrahlungsstärke ( $I_{grenz}$ ) den Schwellwert, ab dessen Überschreitung der Sonnenschutz „aktiviert“ wird. Liegt die senkrecht auf das Fenster einfallende Strahlung unterhalb dieses Grenzwertes, wird der Sonnenschutz nicht aktiviert<sup>3</sup>. Ferner nutzen verschiedene Sonnenschutzsteuerungen die Beleuchtungsstärke  $E_v$  [lx] als Steuerungsgröße, aufgrund der

---

<sup>2</sup> DIN 4108-2 02.2013: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

<sup>3</sup> Hachtel, Wilhelm und Schlitzberger, Stephan: Rollläden und Sonnenschutz - Optimierung von Energiebedarf und Komfort durch Automation, in: ES-SO Workshop Smart solar shading as innovative concept for energy savings and healthy comfort in low energy buildings, 01.03.2018

preiswerten Sensorik. Generell zeigt sich jedoch, dass die resultierende Globalstrahlung auf die Fensterfläche der relevante Steuerungsparameter der Sonnenschutzsysteme ist.

Während für die Nachweisführung zum sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 S. 22 ff. gelten insbesondere Innentemperaturen als Bewertungskriterium. Aufgrund hochwärmegedämmter Gebäudehüllbauteile im Neubau kann der Einfluss einer erhöhten Außenlufttemperatur im Sommer als direkter Parameter für die Steuerung von außenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen vernachlässigt werden.

Als Richtwerte für die Auslegung von FGL-gesteuerten außenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen werden folgende Ziel-Annahmen getroffen:

Tabelle 2: Ziel-Annahmen zur Steuerung von FGL-Sonnenschutzvorrichtungen

Grenzbestrahlungsstärke [W/m <sup>2</sup> ]	
$I_{grenz,zu}$	300
$I_{grenz,auf}$	150

In der vorhandenen Problemstellung (siehe Abbildung 1 links) wird die Temperatur des FGL-Drahts  $\vartheta_{Draht}$  [°C] (Feststoff) beeinflusst durch die Solare Strahlung  $Q_{Solar}$  [W/m<sup>2</sup>] und die Wärmeleitung  $Q_{th}$  [W] zum umgebenden Medium (Luft). Je nach den vorhandenen Kontaktbedingungen (insbesondere der Wärmeübergangswiderstand  $R_s$  [m<sup>2</sup>K/W], die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/m/K] und der Emissionsgrad  $\varepsilon$  [-]) wird die eine oder die andere Wärmequelle oder -senke maßgebend für die resultierende Drahttemperatur maßgebend. Bei der Betrachtung eines FGL-Drahts in einem Hüllrohr (Rohr=Systemgrenze) kommt der Anteil der Konvektion des draht-umgebenden Fluids (Luft)  $Q_{Konv}$  hinzu. Jeder der drei Arten des Wärmetransports wirken gleichzeitig entweder positiv oder negativ.

Für die gezielte Steuerung der Drahttemperatur in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung sollte die Einflüsse aus Wärmeleitung und Konvektion möglichst minimiert werden. Ausgehend von einem den Draht umhüllenden Rohr oder Kasten ergibt sich deren Außenoberfläche zu deren Systemgrenze. Das Gesamtsystem kann als thermischer Solarkollektor beschrieben werden. Für die Ausführung dieses Kollektors wird das in Abbildung 21 (rechts) dargestellte Prinzip vorgeschlagen. Dabei wird der FGL-Draht durch ein Aluminiumrohr geführt. Darum befindet sich ein isolierendes Gas, darum ein Glas oder PMMA-Rohr. Beide Enden sind möglichst luftdicht zu gestalten.

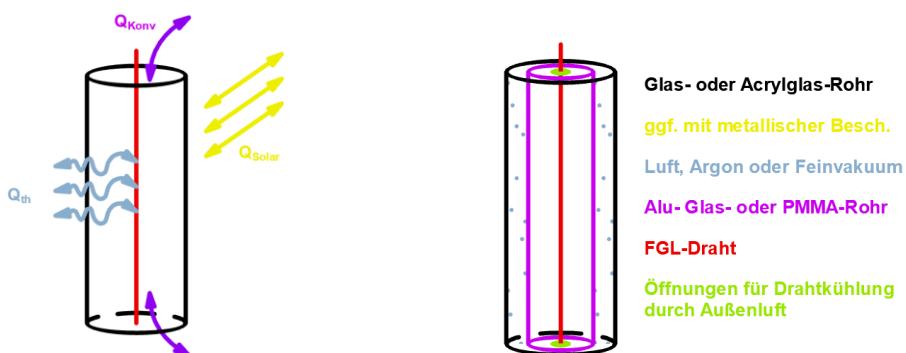


Abbildung 21: Thermodynamische Einflüsse auf das System (links) und Prinzipskizze zur Einstellung der FGL-Drahttemperatur (rechts)

## Arbeitspunkt K1.2 (ABS) Fertigungs- und einbautechn. Anforderungen/Konzept; Schnittstellen zu bisher verwend. Konstruktionstools für konventionell angetrieb. Verschattungselemente

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden die Anforderungen an ein Konstruktionstool für das SmartSkinReal-Verschattungssystem in fertigungs- und einbautechnischer Hinsicht untersucht. Hierbei wurden bestehende Softwarelösungen betrachtet und geprüft, ob sie im Rahmen des Projektes verwendet bzw. integriert werden können.

Relevant sind insbesondere geometrische Änderungen an den entwickelten Komponenten. Die Softwarelösung der Wahl ist das Programm Inventor von Autodesk. Diese bietet Anwendern die Möglichkeit einer parametrisierten Konstruktion. Dabei können Geometrien mit Abhängigkeiten definiert werden. Bei der Veränderung eines einzelnen Parameters ändert sich das gesamte Modell entsprechend. Eine Programmübergreifende Schnittstelle zur Implementierung von Parametern ist über einen Datenimport möglich. Das überschreibt die Parameter und modifiziert das dahinterliegende 3D-Modell inklusive der Fertigungs- und Montagezeichnungen.

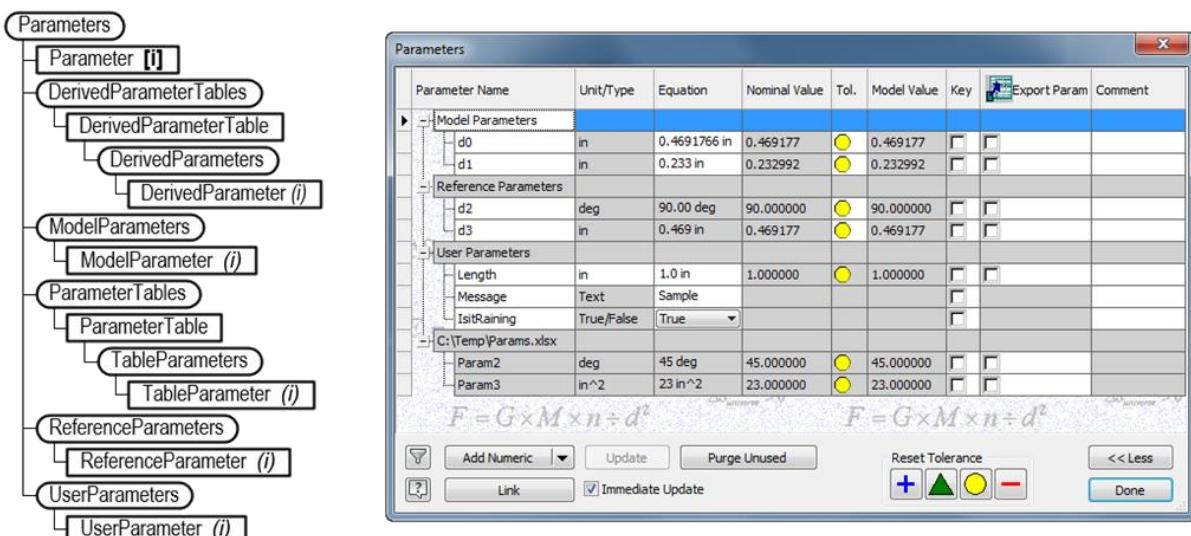


Abbildung 22: Autodesk Inventor bietet die Möglichkeit Konstruktionen parametrisiert zu entwickeln<sup>4</sup>

## Arbeitspunkt K1.3 (IngP) Anforderungen/Konzept bezüglich anwendungsspez. Materialparameter, elektromech. Anbindung sowie Drahteinbau in Aktoren

Bei der Herstellung von FGL-Materialien gibt es verschiedene Parameter, die die Materialeigenschaften beeinflussen können.

- Wahl des Basismaterials: Die Wahl des Basismaterials der Legierung hat einen großen Einfluss auf die Eigenschaften des FGL-Materials. Verschiedene Metalle haben unterschiedliche mechanische und thermische Eigenschaften und können somit unterschiedliche Anwendungen haben.

<sup>4</sup> Ekins, B., Nagy, A. (2017) Units and Parameters in Inventor [online]

[https://modthemachine.typepad.com/my\\_weblog/2017/04/units-and-parameters-in-inventor.html](https://modthemachine.typepad.com/my_weblog/2017/04/units-and-parameters-in-inventor.html) (abgerufen am 27.03.2023)

- Drahtdurchmesser: Der Durchmesser des Drahtes hat ebenfalls einen Einfluss auf die Materialeigenschaften. Ein dickerer Draht kann beispielsweise eine höhere Tragfähigkeit und niedrigere mechanische Spannungen im Belastungsfall aufweisen als ein dünnerer Draht.
- Legierungszusammensetzung: Die Legierungszusammensetzung kann ebenfalls die Eigenschaften des FGL-Materials beeinflussen. Durch das Hinzufügen von Legierungselementen können beispielsweise die Festigkeit oder Korrosionsbeständigkeit des Materials verbessert werden.
- Wärmebehandlung: Die Wärmebehandlung des FGL-Materials kann die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Materials verbessern. Durch eine gezielte Wärmebehandlung kann beispielsweise die Festigkeit des Materials erhöht oder die Formbarkeit verbessert werden.
- Oberflächenbehandlung: Die Oberflächenbehandlung kann ebenfalls die Eigenschaften des FGL-Materials beeinflussen. Eine Beschichtung oder Veredelung der Oberfläche kann beispielsweise die Korrosionsbeständigkeit des Materials verbessern.
- Herstellungsverfahren: Das gewählte Herstellungsverfahren kann ebenfalls die Materialeigenschaften beeinflussen. Unterschiedliche Herstellungsverfahren können beispielsweise zu unterschiedlichen Korngrößen oder Orientierungen der Kristallstruktur führen, was wiederum Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Materials hat.

#### **Arbeitspunkt K1.4 (BWO) Baukonstrukt. und baurechtl. Anforderungen/Konzept hinsichtlich Integration der Systembestandteile in die Fassade sowie Dimensionierung der Versorgung und Kopplung selbiger an Steuerung; Schnittstellen zu konventionellen Konstruktionstools**

Für die bauliche Untersuchung könnten folgende Parameter oder Kenngrößen relevant sein:

- Maße der zu verschattenden Fensteröffnung sowie Positionen und Anzahl von Befestigungselementen
- Position des Aktor-Antriebs
- Tragfähigkeit und Stabilität der Betonfertigteile für die Integration des SmartSkinReal-Sonnenschutzsystems
- Dicke und Festigkeit des Betons für die Integration von Batterien in Betonfertigteile
- Maße und Geometrie der Betonfertigteile für die Integration des SmartSkinReal-Sonnenschutzsystems und der Batterien
- Verwendung von Betonzusatzstoffen für die Herstellung der Betonfertigteile
- Baurechtliche Vorschriften und Anforderungen für die Integration des SmartSkinReal-Sonnenschutzsystems und der Batterien in Betonfertigteile und Gebäudeklasse
- Wirtschaftliche Aspekte für die Herstellung und Integration von SmartSkinReal-Sonnenschutzsystemen und Batterien in Betonfertigteile
- Strombedarf je Zyklus, Anzahl von Bedarfs-Schaltzyklen und PV-Ertrag

#### **Arbeitspunkt K1.5 (CAV) Steuerungstechn. Anforderungen/Konzept inkl. Serienfertigung, Nutzerverhalten und Kopplung mit Verschattung; Schnittstellen zu konventionellen Tools für Steuerungen**

Die speziellen Anforderungen an die Steuerung hängen von der möglichen Nutzung des Verschattungssystems ab. Um in den autarken Betrieb einzutreten und somit zu übersteuern, muss die Temperatur und die aktuelle Position bekannt sein. Diese Parameter beeinflussen die benötigte Energiemenge und somit die Bestromungsdauer des Drahtes.

Ziel ist es, den Spannungsbereich im Bereich der Schutzkleinspannung (SELV) nicht zu überschreiten. Dabei kann es bei niedrigen Außentemperaturen zu einer längeren Bestromungsdauer kommen.

Die damit resultierenden Verzögerungen können dem Nutzer über Anzeigen dargestellt werden. Des weiteren werden mögliche Fehler angezeigt. Ein Nichterreichen einer gewünschten Position oder eine Störung des FGL-Drahtes wird an den Nutzer gemeldet. Somit sollen Bedienfehler ausgeschlossen werden.

Durch vorhandene Schnittstellen ist es möglich die Bedarfssteuerung in vorhandene Gebäudeleittechnik zu integrieren. Die Adaptierung in verschiedene Bus-Systeme wie z.B.: KNX, M-Bus, Modbus, lässt sich realisieren.

Auch eine Integration in konventionelle Elektroinstallation, wie Jalousieschalter ist möglich.

### **Arbeitspunkt K1.6 (TUC) Anforderungen/Konzept bezüglich FGL-Aktorsystemen (Konstruktionsdetails, Integration FGL-Antrieb, Modularität, Skalierbarkeit, Weiterverarbeitung von Zuliefererprodukten)**

Die Konstruktionsdetails sind entscheidend für den Erfolg eines jeden Projekts. Sie umfassen spezifische Techniken, Methoden und Materialien, die zur Gestaltung eines Produkts oder eines Systems verwendet werden, das stabil, dauerhaft und effizient ist. Im Bericht werden wichtigste Schlüsselfaktoren für Konstruktionsdetails erörtert und wie sie zu einem erfolgreichen Projektergebnis beitragen. Einer der kritischsten Aspekte bei den Konstruktionsdetails ist die Auswahl der geeigneten Materialien. Die Materialien müssen einerseits vordefinierte Festigkeit aufweisen, um das Gewicht und die äußereren Lasten zu tragen, anderseits müssen sie den Umwelteinflüssen widerstehen. Ein anderer Faktor ist die Kosteneffizienz, um das Budget einzuhalten. Ein weiterer wichtiger Punkt sind die Montagemethoden, die zur Herstellung des Produkts oder Systems eingesetzt werden. Je nach den verwendeten Materialien und den Anforderungen im Projekt können die Montageverfahren wie Schweißen, Verschrauben, Kleben umfassen. Außerdem spielt Design ebenfalls eine wichtige Rolle. Der erste Schritt bei der Integration eines FGL-Antriebs ist die Auswahl eines geeigneten FGL-Materials für die jeweilige Anwendung. FGL-Materialien können in ihrer Zusammensetzung und ihren Leistungsmerkmalen variieren. Daher ist die Auswahl des geeigneten Materials entscheidend für den Erfolg des Projekts. Zu den zu berücksichtigenden Faktoren gehören die vordefinierte Betätigungszeit, die Reaktionszeit und die Umgebungsbedingungen, denen das Material ausgesetzt sein wird. Der nächste Schritt bei der Integration eines FGL-Antriebs ist die Konstruktion des Antriebs selbst. Dies beinhaltet die Definition der geeigneten Geometrie und Abmessungen des Aktuators, sowie die Platzierung und Ausrichtung des FGL-Materials innerhalb des Aktuators. Die Auslegung des Aktuators sollte den gewünschten Bewegungsbereich, die Reaktionszeit und die für die jeweilige Anwendung erforderliche Betätigungszeit berücksichtigen. Sobald der FGL-Antrieb integriert und montiert ist, muss der getestet und optimiert werden, um sicherzustellen, dass er die vordefinierte Leistung erbringt (Eigenschaftsabsicherung). Dies kann die Messung der Betätigungszeit und der Reaktionszeit des Systems, sowie die Ermittlung möglicher Fehlerquellen oder Instabilitäten umfassen.

Der folgende Abschnitt enthält eine Beschreibung der verschiedenen Baugruppen, aus denen der Aktuator besteht, sowie eine Erläuterung zu dem Entscheidungsprozess, der die Konstruktion des Aktuators beeinflusst hat. Jeder Baugruppe wurden Teilenummern (z. B. ①, ②) zugewiesen, um sicherzustellen, dass die Beschreibung einfach und leicht verständlich ist. Durch die Verwendung der Teilenummern können die Leser den Montageprozess besser nachvollziehen und die Gesamtkonstruktion des Aktuators besser verstehen.

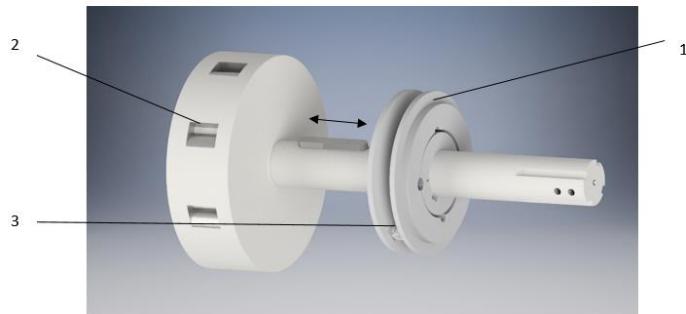


Abbildung 23: Der 3D-CAD-Teil zur Steuerung der Lamellendrehung

Dieser Abschnitt beschreibt die Funktionsweise und die Komponenten eines Mechanismus, der zur Steuerung der Lamellendrehung übernimmt. Der Mechanismus umfasst einen Hubmagneten (①), der die Welle in drei Positionen arretiert und zwar genau bei  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Wenn ein elektrischer Strom angelegt wird, wird der Stift (① in der Abbildung 24) so bewegt, dass er in einen entsprechenden Verriegelungspunkt auf der Welle der Baugruppe 01 eingreift und eine weitere Drehung verhindert. Der Sensor (②) misst einen Drehwinkel der Welle zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ . Mit Hilfe des Sensors wird sichergestellt, dass die Verriegelungspunkte des Lasthebemagneten genau in den Winkeln  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  positioniert sind. Der Mechanismus enthält Haltevorrichtungen (③, ④ und ⑤) für den Lasthebemagneten und den Sensor, die durch Langlöcher flexibel zu einander und in der Grundplatte (⑥) positioniert werden können. Schließlich ist die gesamte Baugruppe zum Schutz vor Umwelteinflüssen mit Glasfaser ummantelt.



Abbildung 24: Die 3D-CAD-Teile zur Befestigung der Komponenten und Sensoren

Dieser Abschnitt beschreibt einen Mechanismus, der aus einer Rückholfeder, einem Schraubhaken und einem Kraftmesssensor besteht. Alle Maschinenkomponenten sind flexibel untereinander mittels Langlöcher f positionierbar. Das bedeutet, dass die Komponenten in verschiedenen Konfigurationen angeordnet werden können, um den Anforderungen der Anwendung gerecht zu werden und Flexibilität der Konstruktion und Montage zu ermöglichen. Die Rückholfeder ist mit dem Schraubhaken verbunden, der in den Kraftmesssensor eingeschraubt ist. Die gemessenen Kräfte werden dann für die Modellierungs- und Simulationszwecke verwendet, z. B. zur Vorhersage des Systemverhaltens bei unterschiedlichen stochastischen Lasten. Darüber hinaus lassen sich

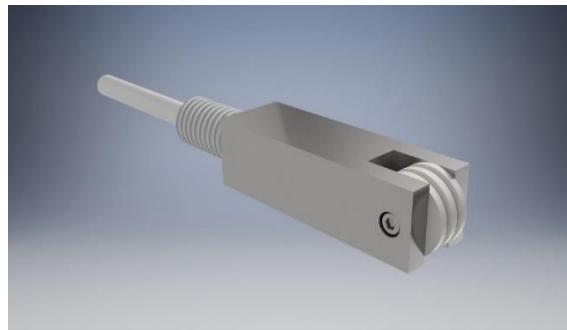


Abbildung 25: Der 3D-CAD-Mechanismus zur Steuerung und Regelung des FGL-Drahtes

Die Materialauswahl, ist von entscheidender Bedeutung, da die Konstruktion den stochastischen Belastungen (z. B. Wind) und den Umwelteinflüssen ausgesetzt sind. So bietet das Material "EN-GJL-300" die gewünschten Eigenschaften an. Es handelt sich um ein hochfestes Material mit ausgezeichneter Verschleißfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Dämpfungseigenschaften. Einer der Hauptgründe für die Wahl von EN-GJL-300 ist seine hohe Korrosionsbeständigkeit. Ein weiteres wichtiges Merkmal ist die hohe Belastbarkeit des Materials. Während des Baus wird das Material verschiedenen Kräften wie Druck, Zug und Biegung ausgesetzt sein.

## II.1.5 Arbeitspaket K2: Algorithmenentstaltung

In den Teilarbeitspaketen zur K2 Algorithmenentstaltung erfolgte die vorwiegend theoretische Auslegung, Bemessung, Berechnung, Modellierung etc. der verschiedenen Teildemonstratoren der einzelnen Partner. Das Ziel ist es die die verschiedenen Einflussfaktoren auf und in den verschiedenen Komponenten des SmartSkinReal Verschattungssystems in separaten Modellen geometrisch und physikalisch oder numerisch abbilden zu können. Dabei sind z.T. Messergebnisse aus anderen Arbeitspaketen nachgerechnet und die Modelle validiert worden. Diese Modelle ermöglichen die Auslegung und Berechnung der einzelnen Komponenten in Abhängigkeit je verschiedener Einflussparameter. Ferner erlauben die Modelle auch die Veränderung der verschiedenen Einflussgrößen zur Untersuchung von Einflussgrößen.

### **Arbeitspunkt K2.1 (HTWK) Algorithmenentwicklung zu gebäudeseitig konstruktiven und bauphysikalischen Aspekten**

Die im Arbeitspunkt T2.1 durchgeführten Untersuchungen zur Drahttemperatur wurden in einer Simulationsstudie rechnerisch modelliert.

Ziel der Simulationen ist im ersten Schritt deren Validierung und Bewertung der Qualität der Berechnungsergebnisse. Im zweiten Schritt soll das Simulationsmodell mit verschiedenen Klimadatensätzen und Ausrichtungen durchgeführt werden. Dabei soll das Verhalten eines hypothetischen Kollektors an vielen verschiedenen Positionen berechnet und eingeschätzt werden können. Das validierte Simulationsmodell ermöglicht somit die Übertragung von Ergebnissen auf beliebige Standorte.

Für die Modellierung der Drahttemperatur im Kollektor nutzten wir die hygrothermische Simulationssoftware Delphin 5.9<sup>5</sup>. Im 2D-ratation-symmetric-horizontal-transport-construction-mode wurden die Kollektorkonstruktionen modelliert. Im Zentrum aller Modellvarianten steht ein metallischer Draht mit einem Durchmesser von 1 mm. Daran angrenzend wird eine ruhende Luftsicht mit entsprechendem Radius sowie ein metallisches bzw. Kunststoffrohr mit der Wandungsdicke angesetzt. Als Randbedingungen wurden Messdaten der gerichteten Solarstrahlung und der Umgebungstemperatur angesetzt. Das ermöglicht die direkte Gegenüberstellung von gemessenen Drahttemperaturen mit berechneten. Für die Berücksichtigung von umschließenden PMMA-Rohren wurden die Übergangswiderstände angepasst. Der Temperaturübergangswiderstand zur Außenluft  $R_{se,ssr}$  ergibt sich zu:

$$R_{se,ssr} = R_{se} + R_{Air} + R_{PMMA}.$$

Der Temperaturübergangswiderstand erhöht sich damit um die Temperaturdurchlasswiderstände der ruhenden Luftsicht und des PMMA-Rohrs ( $R_{se,ssr} = 0,04 + 0,193 + 0,005 = 0,238$ ). Der Emmissionsgrad der Oberfläche für die auftreffende Strahlung  $\varepsilon_{ssr}$  ergibt durch Multiplikation mit dem Gesamtenergiendurchlassgrad  $g_E$  sich zu:

$$\varepsilon_{ssr} = \varepsilon_{Alu} * g_{E, PMMA} * 0,5$$

Da die Globalstrahlung entsprechend dem Sensorsignal die Rohroberfläche nur frontal bestrahlt, ist der Wert zu halbieren ( $\varepsilon_{ssr} = 0,9 * 0,73 * 0,5 = 0,33$ ).

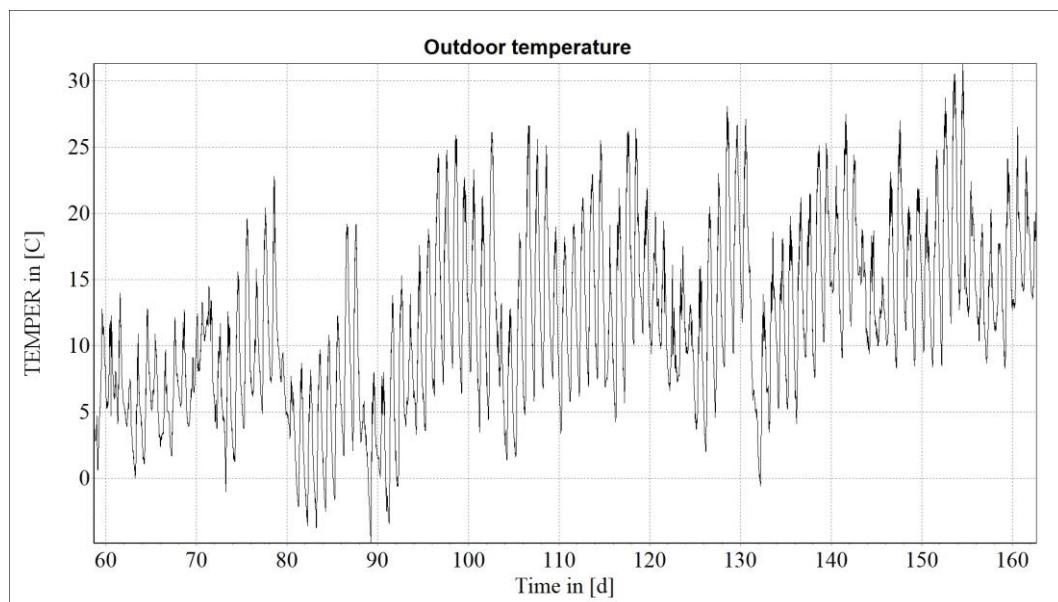


Abbildung 26: Darstellung der gemessenen Außenlufttemperatur

---

<sup>5</sup> Quelle: Nicolai, A., Scheffler, G.A., Grunewald, J., Plagge, R., 2009. An Efficient Numerical Solution Method and Implementation for Coupled Heat, Moisture, and Salt Transport: The DELPHIN Simulation Program, in: Franke, L., Deckelmann, G., Espinosa-Marzal, R. (Eds.), Simulation of time dependent degradation of porous materials. Final report on Priority Program 1122, funded by the German Research Foundation DFG, 1. Aufl. ed. Cuvillier, Göttingen, pp. 85–100.

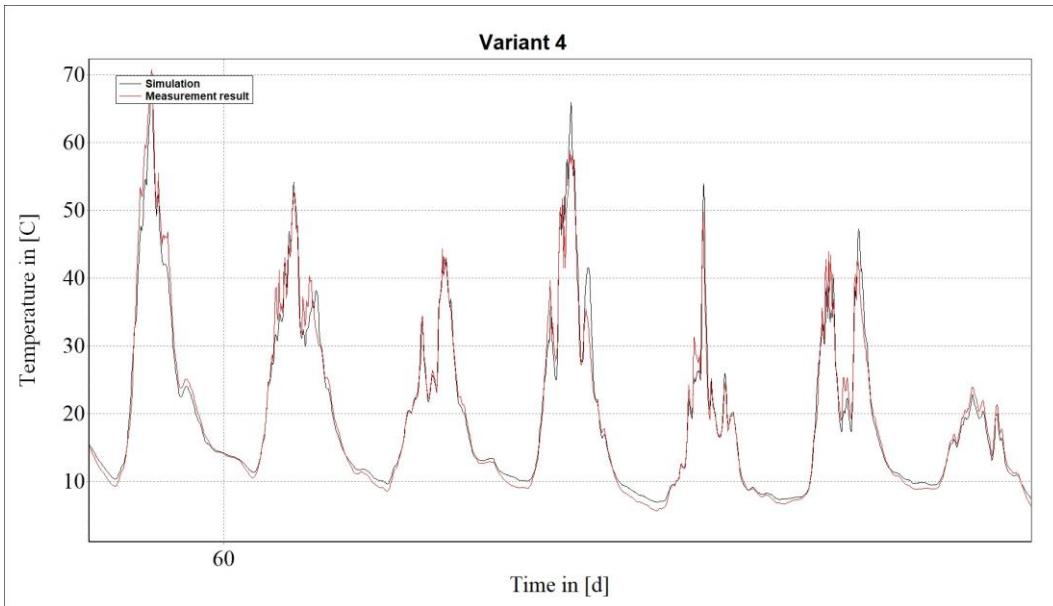


Abbildung 27: Vergleich von gemessener und simulierter Drahttemperatur im Kollektor

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Drahttemperatur. Das entwickelte Modell ist im hohen Maß geeignet um Temperaturen von Drähten in der gewählten Kollektorkonstruktion vorherzusagen. In einer Parameterstudie wurden nun verschiedene Klimadatensätze in das Modell implementiert.

### **Arbeitspunkt K2.2 (ABS) Ablaufschemataentwicklung zu verschattungsseitig konstruktiven Systemkriterien, der Aktoranbindung und den Fertigungsschritten unter Berücksichtigung überschneidungsfreier Integration des Auslegungswerkzeuges in unternehmens-interne Software**

Für die Entwicklung eines spezifischen Ablaufschemas zur Fertigung und Montage des SmartSkinReal-Verschattungssystems wurden zunächst die verschiedenen möglichen Varianten definiert.

Als primärer Eingangsparameter dient die Größe des zu verschattenden Fensters/ Fassadenfläche. Aus thermisch-mechanischen Berechnungen geht hervor, dass der FGL-Draht-bestückte Solarkollektor eine Länge von 2,00 m nicht unterschreiten soll. Daraus resultieren prinzipielle Anordnungen des Solarkollektors in vertikaler (wie bei den gefertigten Großdemonstratoren) und in horizontaler Anordnung. Eine horizontale Anordnung ließe sich mit den entwickelten Aktorkomponenten voraussichtlich umsetzen.

Die Verschiebung der Position des Aktors an die Unterseite des Verschattungssystems wurde untersucht und ließe sich auch technisch umsetzen.

Auch die rechtsseitige, gespiegelte Anordnung des Aktors wäre aus Fertigungs- und Montagesicht problemlos möglich.

Daraus ergeben sich acht verschiedene prinzipielle Konstruktionsvarianten zur Fertigung und Montage des SmartSkinReal-Verschattungselementes.

In der aktuellsten Variante des Aktors ist ein frei hängendes Gewicht anstatt einer Feder als Gegenkraft vorgesehen. Für Lösungen bei denen der Aktor am unteren Ende des Verschattungssystems angebracht ist lässt sich diese Lösung nur mit großem Aufwand realisieren. Diese wurden für die weitere Bearbeitung entsprechend verworfen, wobei sich die Anzahl der Aktor-Konstruktionsvarianten auf vier reduziert.

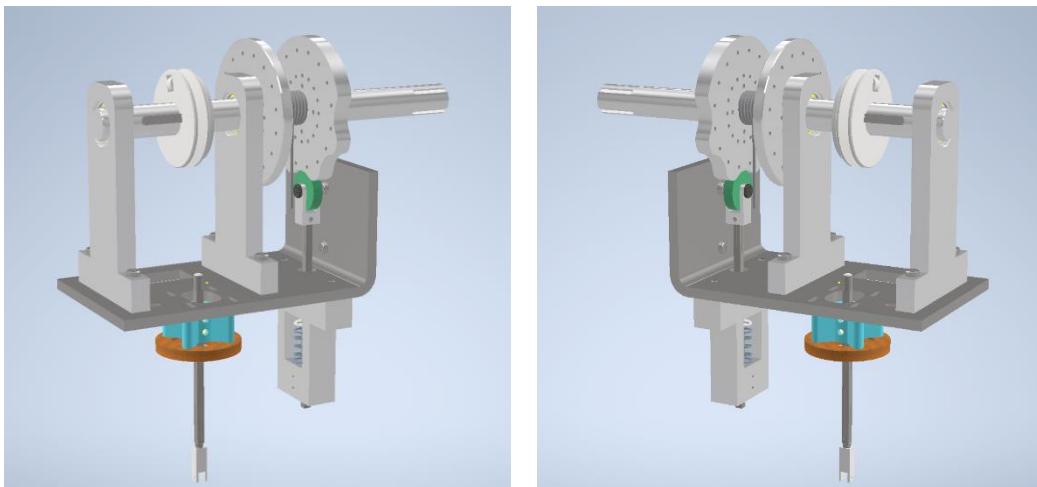


Abbildung 28: Die entwickelten Bauteile des SSR-Pototypen II können (mit Ausnahme der Grundplatte) sowohl für die linke, als auch für die rechte Anordnung des Aktors genutzt werden.

### **Arbeitspunkt K2.3 (IngP) Algorithmenentwicklung zu Aspekten der Auslegung der Produktionsparameter und Materialeigenschaften der FGL-Drähte**

Es gibt verschiedene Programme und Methoden, mit denen die Eigenschaften von metallischen FGL-Materialien berechnet oder abgeschätzt werden können. Gängige Berechnungsmodelle sind:

- Finite-Elemente-Methode (FEM): Diese Methode wird häufig verwendet, um die mechanischen Eigenschaften von FGL-Materialien zu simulieren. Sie berücksichtigt dabei die komplexen geometrischen Formen und Materialstrukturen und kann somit präzisere Vorhersagen liefern als andere Methoden.
- Molekulardynamik-Simulation (MD): Diese Methode verwendet computerbasierte Simulationen, um die Struktur und das Verhalten von FGL-Materialien auf atomarer Ebene zu untersuchen. Sie kann dabei helfen, die thermischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften von FGL-Materialien zu bestimmen.
- Thermodynamische Modelle: Diese Modelle basieren auf der statistischen Thermodynamik und beschreiben die Materialien als Ensemble von Atomen oder Molekülen. Sie können dabei helfen, die Phasenübergänge, die Kristallstruktur und die thermischen Eigenschaften von FGL-Materialien zu berechnen.
- Empirische Methoden: Hierbei werden experimentelle Daten über die Materialeigenschaften von FGL-Materialien verwendet, um mathematische Modelle zu entwickeln. Diese Modelle können dann verwendet werden, um die Eigenschaften von FGL-Materialien zu simulieren oder vorherzusagen.
- Ab-initio-Berechnungen: Diese Methode basiert auf quantenmechanischen Prinzipien und kann genaue Vorhersagen für die elektronischen, optischen und magnetischen Eigenschaften von FGL-Materialien liefern.

Für die Bemessung der FGL-Materialien in SmartSkinReal wurden vorrangig mit empirischen Daten gearbeitet. Aufgrund der hochauflösten Datengrundlage verschiedener Autoren und eigener Erfahrungen konnten so die verlässlichsten Ergebnisse erzielt werden. Prinzipiell können jedoch auch rechnerische Modelle angewendet werden um spezifische Legierungen für bestimmte Temperatur-Schaltpunkte zu bestimmen.

Die aktorische Performance des durch elektrischen Strom betriebenen FGL-Drahtes ist von den Werkstoffeigenschaften abhängig. Zur Prüfung und Berechnung der Performance der unterschiedlichen Legierungen wurde ein analytisches Modell hergeleitet. Zugrunde gelegt wurde eine mathematische Beschreibung der Wärmebilanz, s. Formel 1.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{Q_{ges}}{\Delta t} & Q_{ges} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \\
 U &= \sqrt{P \cdot R} & Q_1 &= m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \\
 I &= \frac{P}{U} & Q_2 &= m \cdot \Delta h \\
 && Q_3 &= \alpha \cdot A \cdot (T_2 - T_1) \cdot \Delta t \\
 && Q_4 &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \cdot \Delta t
 \end{aligned}$$

m...	Massen [kg]
T...	Temperatur [K]
c <sub>p</sub> ...	spezifische Wärmekapazität
Δh...	spezif. Umwandlungsenthalpie für NiTi
α =	Wärmeübergangskoeff. für NiTi in Medium
ε = ...	Emissionsgrad für NiTi
σ...	Stefan – Boltzmann – Konstante
A...	Mantelfläche [mm <sup>2</sup> ]
Δt...	Aufheizdauer [s]
Q <sub>ges</sub> ...	Gesamtenergie [Ws]
Q <sub>1</sub> ...	Erwärmung [Ws]
Q <sub>2</sub> ...	Phasenumwandlung [Ws]
Q <sub>3</sub> ...	Konvektion [Ws]
Q <sub>4</sub> ...	Strahlung [Ws]

Formel 1: Gleichungen des mathematischen Modells zur Bestimmung der Bestromungsparameter und Aktorperformance.

## Arbeitspunkt K2.4 (BWO) Ablaufschemataentwicklung zur konstruktiven Bauintegration und Dimensionierung der Steuerungsversorgung unter Berücksichtigung überschneidungsfreier Integration des Auslegungswerkzeuges in unternehmensinterne Software

Im Rahmen des Arbeitspakets K1.4 wurden bauliche Anforderungen untersucht, die bei der Integration des SmartSkinReal-Sonnenschutzsystems in Betonfertigteile zu beachten sind. Hierbei ging es insbesondere um die Frage, wie das System in die Baukonstruktion integriert werden kann, ohne dass die Stabilität und Tragfähigkeit des Gebäudes beeinträchtigt wird. Auch die Frage nach der möglichen Gewichtsbelastung der Konstruktion durch das Sonnenschutzsystem war von Bedeutung. Weitere bauliche Anforderungen betrafen die Montage des Systems und die notwendigen Aussparungen und Verankerungen im Beton. Hierbei musste sichergestellt werden, dass die Konstruktion ausreichend stabil und dicht ist, um eine zuverlässige Funktion des Sonnenschutzsystems zu gewährleisten. Darüber hinaus waren auch die Anforderungen an die Gebäudehülle zu berücksichtigen, um eine möglichst effiziente Nutzung des Sonnenschutzsystems zu ermöglichen. Hierzu zählen beispielsweise Faktoren wie die Ausrichtung und Neigung der Fassade, die Größe und Anzahl der Fenster sowie die thermischen Eigenschaften der Fassade und der Verglasung. Insgesamt ging es bei den baulichen Anforderungen darum, eine harmonische Integration des Sonnenschutzsystems in die Baukonstruktion zu erreichen, die sowohl funktional als auch ästhetisch ansprechend ist. Dabei mussten die technischen Anforderungen des Sonnenschutzsystems und die baurechtlichen Vorschriften berücksichtigt werden.

Auch statische Anforderungen wurden untersucht, die bei der Integration des SmartSkinReal-Sonnenschutzsystems in Betonfertigteile zu berücksichtigen sind. Hierbei ging es insbesondere um die Belastbarkeit der Bauteile sowie um mögliche Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des Gebäudes. Konkret sind bei der Untersuchung statischer Anforderungen folgende Aspekte betrachtet worden:

- **Tragfähigkeit:** Die Integration des Sonnenschutzsystems darf nicht zu einer Verringerung der Tragfähigkeit des Gebäudes führen. Insbesondere müssen die statischen Lasten des Sonnenschutzsystems sowie die Lasten, die bei der Montage und Demontage des Systems entstehen, berücksichtigt werden.
- **Verformungen:** Die Integration des Sonnenschutzsystems darf nicht zu unzulässigen Verformungen des Gebäudes führen. Insbesondere müssen die Verformungen des Sonnenschutzsystems sowie die thermischen Verformungen durch Sonneneinstrahlung und Temperaturschwankungen berücksichtigt werden.

- Lastverteilung: Die Integration des Sonnenschutzsystems muss eine gleichmäßige Lastverteilung auf das Gebäude gewährleisten, um lokale Spannungen und Verformungen zu vermeiden.
- Sicherheitsfaktoren: Die statischen Berechnungen müssen unter Berücksichtigung ausreichender Sicherheitsfaktoren durchgeführt werden, um eine ausreichende Tragfähigkeit und Stabilität des Gebäudes zu gewährleisten.

Diese Anforderungen sind von Bedeutung, um sicherzustellen, dass die Integration des Sonnenschutzsystems in Betonfertigteile keine negativen Auswirkungen auf die Stabilität und Sicherheit des Gebäudes hat. Im Ergebnis können die statischen Bemessungsgrundsätze des Herstellers des Basis-Sonnenschutzsystems COLT (SolarFIN) übernommen werden. Zusätzliche Kräfte durch den entwickelten alternativen FGL-Antrieb können vernachlässigt werden.

Baurechtliche Anforderungen können je nach Land und Region unterschiedlich sein. In Deutschland gibt es zum Beispiel die Musterbauordnung (MBO) und die Landesbauordnungen (LBO), die verschiedene Vorschriften für Bauwerke und ihre Nutzung enthalten. Bei der Integration des SmartSkinReal-Sonnenschutzsystems in Betonfertigteile müssen diese Vorschriften beachtet werden. Insbesondere müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Brandschutz: Die Betonfertigteile müssen den geltenden Brandschutzanforderungen entsprechen und dürfen im Brandfall keine Gefahr für die Bewohner des Gebäudes darstellen.
- Standsicherheit: Die Integration des Sonnenschutzsystems darf die Standsicherheit des Bauwerks nicht beeinträchtigen. Die Lasten aus dem Sonnenschutzsystem müssen sicher abgetragen werden.
- Energieeffizienz: Das Sonnenschutzsystem sollte dazu beitragen, den Energiebedarf des Gebäudes zu senken und den Einsatz von Klimaanlagen zu reduzieren.
- Denkmalschutz: Bei der Sanierung von historischen Gebäuden müssen die baurechtlichen Anforderungen des Denkmalschutzes berücksichtigt werden.

Die Anforderungen wurden im Rahmen von K1.4 geprüft. Im Wesentlichen lassen sich auch hier die Lösungen des Herstellers COLT (SolasFIN) übernehmen. Lediglich der im Prototypen genutzte Acrylglas-Solarkollektor könnte potenziell Probleme beim Brandschutznachweis nach sich führen. In einer nächsten Version des SSR-Sonnenschutzes sollte dieser durch eine nichtbrennbare Version (min. A2) ersetzt werden. Beispielsweise könnte sich hier ein Glasrohr eignen.

Im Rahmen des Arbeitspakets K1.4 wurde auch die Integration von Batterien in Betonfertigteile untersucht. Hierbei ging es darum, zu klären, inwieweit es möglich ist, Batterien in Betonbauteile zu integrieren, um sie als Energiespeicher zu nutzen. Dafür wurden im Betonwerk Oschatz 1:1 Probekörper entwickelt, die zur Untersuchung der Nutzung von Betonelementen als Batterietaschen dienen sollten. Problematisch erscheint hier insbesondere die Anwendung bei vorhandenen Brandschutzanforderungen. Die Integration von Batterien in Wandbauteilen ist prinzipiell revisionierbar zu gestalten. Eine Kapselung innerhalb des Betons erscheint wenig sinnvoll. Bei Brandschutzanforderungen sind entsprechend Lösungen zu entwickeln und Brandschutzprüfungen durchzuführen. Eine Bearbeitung innerhalb des SSR-Projekts war nicht vorgesehen und würde den Projektrahmen sprengen.

Die 1:1 Probekörper wurden im Betonwerk Oschatz entwickelt und sollten dazu dienen, die Nutzung von Betonelementen als Batterietasche zu untersuchen. Konkret handelte es sich um Betonelemente, die als Taschen für Batterien dienen sollten. Hierfür wurden spezielle Geometrien der Betonelemente entwickelt, die die optimale Aufnahme von Batterien ermöglichen sollten. Die Probekörper wurden in realer Größe hergestellt, um ihre Eignung für die Verwendung als Batterietaschen zu testen. Durch Tests und Messungen sollten Informationen darüber gewonnen werden, wie gut sich Betonelemente für die Integration von Batterien eignen und welche Anforderungen an die Geometrie und Festigkeit

gestellt werden müssen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen könnten dazu beitragen, dass Betonelemente in Zukunft vermehrt als Batterietaschen zum Einsatz kommen könnten.

Um ein PV-Batterie-System als Energiequelle für das autark zu betriebende SSR-Verschattungssystem zu bemessen, müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Zunächst war der Energiebedarf des Stromverbrauchers zu ermitteln. Eine durchschnittliche Schaltung des SSR-Prototypen I wurde mit 104 [Wh] gemessen. Der Wert ist voraussichtlich stark Temperaturabhängig (Daten von IngP). Ausgehend von verschiedenen Szenarien ( $A=1,8 [-]$ ;  $B=0,8 [-]$ ;  $C=0,3 [-]$ ) an Schaltvorgängen täglich wurde der durchschnittliche tägliche Energiebedarf und der maximale Spitzenbedarf in Wattstunden (Wh) berechnet ( $A=188 [\text{Wh/d}]$ ;  $B=84 [\text{Wh/d}]$ ;  $C=32 [\text{Wh/d}]$ ). Anschließend kann die benötigte Kapazität der Batterie bestimmt werden, indem man die Tage an durchschnittlicher Stromversorgung multipliziert mit dem durchschnittlichen täglichen Energiebedarf und einem Sicherheitsfaktor ( $c=3,0$ ). Die Batteriekapazitäten ergeben sich zu  $A=564 [\text{Wh}]$ ;  $B=312 [\text{Wh}]$ ;  $C=312 [\text{Wh}]$ . Bei den Varianten B und C war für die Bemessung mindestens ein Schaltvorgang am Tag einzuberechnen. Weiterhin sollte auch ein Laderegler eingeplant werden, um den Ladezustand der Batterie zu überwachen und zu optimieren. Der Laderegler schützt die Batterie auch vor Überladung oder Tiefenentladung.

Die Größe des PV-Moduls hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter der geografischen Lage des Systems, der Ausrichtung und Neigung des Moduls, der jährlichen Sonneneinstrahlung und dem Strombedarf. Hierbei musste auch der Wirkungsgrad der PV-Zellen berücksichtigt werden. Angenommen, die Verluste bei der Umwandlung betragen 15% und die Verluste bei der Speicherung betragen 10%, dann ergibt sich folgender Strombedarf:  $A=251 [\text{Wh/d}]$ ;  $B=112 [\text{Wh/d}]$ ;  $C=43 [\text{Wh/d}]$ .

Nun können wir ein passendes PV-Modul auswählen, das an einem durchschnittlichen Tag genug Energie produzieren kann, um den täglichen Bedarf zu decken. Angenommen, in unserer Region beträgt die durchschnittliche Sonneneinstrahlung 4 Stunden pro Tag, dann benötigen wir ein PV-Modul mit einer Nennleistung von: Nennleistung des PV-Moduls = (Täglicher Energiebedarf des PV-Moduls / Durchschnittliche Sonneneinstrahlung pro Tag) ( $A=63 [\text{W}]$ ;  $B=28 [\text{W}]$ ;  $C=11 [\text{W}]$ ). Ausgehend von einem niedrigen Energieertrag bei bewölktem Himmel im Winter würde für einen vollständig autarken Betrieb die etwa 10,5-fache Peak-Leistung der Module erforderlich ( $A=662 [\text{Wp}]$ ;  $B=294 [\text{Wp}]$ ;  $C=116 [\text{Wp}]$ ).

Die Berechnung eines tatsächlich autarken Systems bleibt stark abhängig von der tatsächlichen Intensität, Frequenz und dem Zeitpunkt der Nutzung. Für die häufige Nutzung im Winter würde ein erforderliches PV-Modul voraussichtlich stark überdimensioniert werden. Ein wirklich sinnvoller Aufbau ließe sich nur durch Realtests abschätzen. Für eine Testphase in einem SSR-Prototyp würde ein PV-Modul mit 100 [Wp] (ca. 0,5 m<sup>2</sup>) und eine Batterie mit 0,4 [kWh] empfohlen.

## **Arbeitspunkt K2.5 (CAV) Ablaufschemataentwicklung zur Auslegung der Bedarfssteuerung und ihrer Fertigungsschritte unter Berücksichtigung überschneidungsfreier Integration des Auslegungswerkzeuges in unternehmensinterne Software**

Für die Entwicklung eines Ablaufschemas zur Auslegung der Bedarfssteuerung spielen unterschiedliche Faktoren eine große Rolle. Wichtigster Parameter ist die Größe des zu verschattenden Fensters, bzw. die Größe des Verschattungselementes. Es muss ermittelt werden, welche Energiemenge benötigt wird, um die Mechanik zum Öffnen des Sonnenschutzelementes zu beeinflussen. Des Weiteren ist zwar die Länge des Drahtes bekannt, jedoch nicht die elektrischen Eigenschaften. Diese sind abhängig vom Durchmesser und Legierung des Drahtes. Je nach Konstruktion des Solarkollektors werden ebenfalls

unterschiedliche Energiemengen benötigt. Für die Lösung dieser Problematiken und zur Steuerung der SSR-1:1-Prototypen wurden theoretische Untersuchungen zur Entwicklung einer Steuerung für das SmartSkinReal (SSR)-System durchgeführt. Das System besteht aus einem Netzteil, das zwischen 40V und 80V umgeschaltet werden kann, sowie einer Steuereinheit, die diese elektrische Spannung über Pulsen abschwächt oder verstärkt. Diese Steuereinheit kann auch vom Nutzer des SSR umprogrammiert und angepasst werden, um eine Anpassung an örtliche Gegebenheiten und andere Versuchsaufbauten zu ermöglichen. Im Ergebnis resultierte die Entwicklung von Algorithmen für die Steuereinheit, die eine effektive und effiziente Steuerung des SSR-Systems gewährleisten. Auch die Entwicklung von Schnittstellen für die Nutzerprogrammierung und -anpassung wurde untersucht. Darüber hinaus wurden Überlegungen zur Integration der Steuerung in das Gesamtsystem des Gebäudes oder zur Fernsteuerung des SSR-Systems diskutiert. Eine Integration in verschiedene Bus-Systeme wie sie in der Gebäudeautomation üblich eingesetzt werden (z.B. KNX, M-Bus, Modbus) lässt sich problemlos realisieren.



Abbildung 29: Entwickeltes Netzteil (links) und Steuereinheit mit Anzeige einer Winkelstellung des SSR in Abhängigkeit der Bestromungsstärke (rechts)

### **Arbeitspunkt K2.6 (TUC) Ablaofschemataentwicklung zu Aspekten der Auslegung der FGL-Aktorsysteme und materialspezifischer Kriterien des Herstellprozesses**

Bei der Entwicklung eines Systems, das eine Formgedächtnislegierung (FGL) als Stellglied verwendet, sind die Rückstellfeder und der Durchmesser des FGL-Drahts wichtige Konstruktionsparameter, die berechnet werden müssen, um das ordnungsgemäße Funktionieren des Systems zu gewährleisten. Darüber hinaus muss auch die Umlenkrolle entsprechend ausgelegt sein, um den FGL-Draht zu führen und zu verhindern, dass der sich verbiegt oder an anderen Komponenten reibt. Um die optimale Auslegung dieser Komponenten zu gewährleisten, wurde ein Berechnungsverfahren angewendet werden, das die mechanischen Eigenschaften des FGL-Drahts und die Belastungsbedingungen des Systems berücksichtigt. Im Einzelnen umfasst das Berechnungsverfahren die Analyse des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens des FGL-Drahts, die Bestimmung der maximal zulässigen Spannung auf der Grundlage der Materialeigenschaften des Drahts und die Berechnung des erforderlichen Drahtdurchmessers, um der aufgebrachten Last standzuhalten. Die Umlenkrolle wird dann auf der Grundlage der erforderlichen Drahtdurchbiegung und des minimal zulässigen Biegeradius des Drahtes ausgelegt. Die Federkonstante der Rückholfeder kann auf der Grundlage der gewünschten Kraft, die zur Betätigung des FGL-Drahts erforderlich ist, und der erforderlichen Feder berechnet werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die Feder genügend Kraft aufbringt, um den FGL-Draht in seine ursprüngliche Position zurückzubringen, wenn die externe Last nicht vorhanden ist. Um die Krafteinwirkung auf die Gewichte zu bestimmen, muss der Schwerpunkt der Lamelle und des Steuerstabs bestimmt werden. Diese Berechnung ist in Abbildung 30 dargestellt. Die

Erdbeschleunigung wurde mit  $9,807 \frac{m}{s^2}$  angenommen. Die Masse des Steuerstabs und der Schrauben sind  $1,7kg$  und  $0,226kg$  entsprechend. Daraus folgt die Gewichtskraft der Steuerstange und der Schrauben mit  $F_{rd} = (m_{rod} + m_{Screw}) \times g = 18,89N$ .

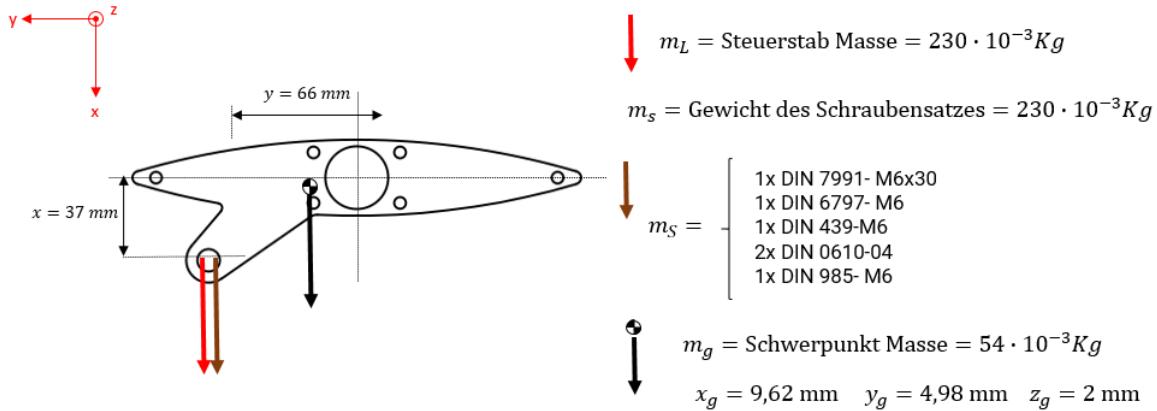


Abbildung 30: Schematische Skizze des Lammens Systems für die Kraftwirkung auf Gewichte

Die Berechnung umfasste die Bestimmung des Abstands zur Drehachse, wie in Abbildung 31 dargestellt. Die Position der Schwerpunkte wurde mit  $x_1 = 66\text{mm}$ , mit  $y_1 = 37\text{mm}$  mm für das erste Objekt und mit  $x_2 = 9,62\text{mm}, y_2 = 4,978 \text{ mm}$  für das zweite Objekt angegeben. Der Rotationsabstand für jedes Objekt wurde dann berechnet als  $b_{rd} = \sqrt{(x_1^2 + y_1^2)} = 0,076\text{m}$  bzw.  $b_g = \sqrt{(x_2^2 + y_2^2)} = 0,011\text{m}$ . Der Drehwinkel für das erste Objekt wurde mit  $\alpha = \text{atan}(y_1/x_1) = 29,275^\circ$  und der Drehwinkel für das zweite Objekt mit  $\beta = \text{atan}(y_2/x_2) = 27,36^\circ$  bestimmt. Die Hebelarme sind für die Positionen  $\varphi_1 = 0^\circ$ ,  $\varphi_2 = 45^\circ$  und  $\varphi_3 = 90^\circ$  berechnet, was zu maximalen Hebelarmwerten von  $h_{rd,max} = 75,664\text{mm}$  und  $h_{g,max} = 10,832\text{mm}$  in Bezug auf die Rotationsachse führt, wie in Abbildung 31 dargestellt ist.

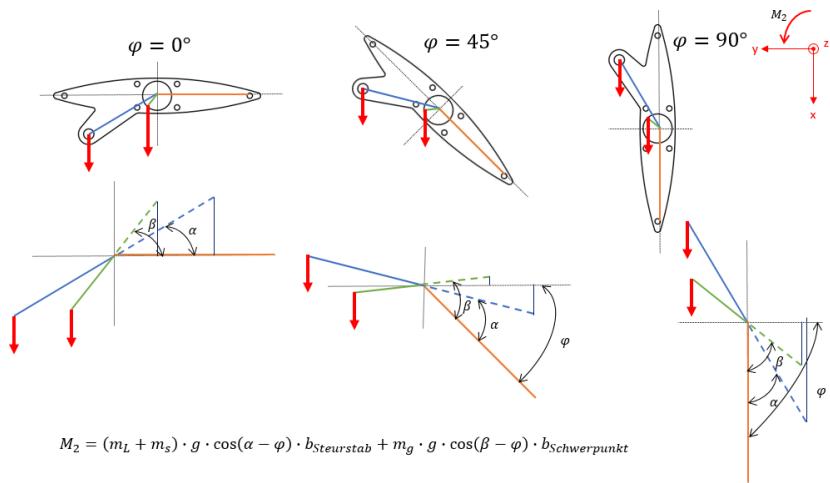


Abbildung 31: Schematische Skizze des Lamelle Systems für die Bestimmung der Distanz zur Rotationsachse

Die Reibung ist in der Konstruktion von beweglichen Bauteilen nicht zu vernachlässigen, da sie einen Einfluss auf die Leistung, Effizienz und Haltbarkeit des Systems hat. Wenn die Reibung vernachlässigt wird, führt dies zu folgenden Problemen, wie kleine Reaktionsgeschwindigkeit des Systems, erhöhter Verschleiß der Bauteile und mangelnde Effizienz. Daher wurde die Hertz'sche Pressung zwischen Lamellen und Lager unter Berücksichtigung des Lamellengewichts und der Kontaktlänge berechnet. Der

Reibwert zwischen den Oberflächen ist aus den Herstellerangaben entnommen. Schließlich wurde die Gesamtreibungskraft der Lamellen durch Multiplikation des Reibungskoeffizienten mit der Gewichtskraft und der Anzahl der Lamellen berechnet. Diese Berechnungen tragen dazu bei, dass das System effektiv, effizient und sicher arbeitet.

In der Berechnung (siehe Zwischenbericht Anforderungsdefinition / Konzeptentwicklung) werden die Drehmomente in den Winkeln  $\varphi_1 = 0^\circ$ ,  $\varphi_2 = 45^\circ$  und  $\varphi_3 = 90^\circ$  der Raststellungen sowie das Reibmoment der Lamellen ermittelt. Der Durchmesser der Umlenkrolle muss auf Grund des Platzmangels zwischen 70 – 95mm liegen, und der gewählte Standarddurchmesser der Umlenkrolle beträgt 90mm. Das maximale Drehmoment tritt bei einem Winkel von etwa  $\varphi_{max} = 45^\circ$  auf und beträgt  $M_{max} = 3,444 Nm$ . Die Kraft des FGL-Drahtes ist auf  $F_{FGL} = 33N$  festgelegt, was Drahtdurchmesser  $d_{FGL} = 0,75mm$  laut Herstellerangaben entspricht.

Die letzte der oben genannten Berechnungen betrifft die Bestimmung der maximal zulässigen Kraft, die ein bestimmtes Bauteil aushalten kann. Aufgrund der idealisierten Annahmen während des Entwurfsprozesses und der geringen erwarteten Belastung wird ein Sicherheitsfaktor zwischen 1,8 und 1,9 angenommen, um unvorhergesehene oder unerwartete Belastungen des Bauteils zu berücksichtigen. Die notwendige Kraft wird mit  $F_{max} = 270N$  angegeben (siehe Zwischenbericht Anforderungsdefinition / Konzeptentwicklung), um die Lamellen zu bewegen. Multipliziert man also  $F_{max}$  mit dem Sicherheitsfaktor, so erhält man die maximal Kraft  $F_{max,final} = 500N$  führt.

Für die Bemessung des FGL-Drahts waren verschiedene Kräfte zu berücksichtigen. Eines der Probleme bei der Bemessung des FGL-Drahts war, dass die Spannung des Drahts die Temperatur-Schaltpunkte temporär verändert. Um diesen Effekt zu minimieren, müssen die Varianzen der Drahtspannungen über die Nutzungsdauer möglichst konstant gehalten werden. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, ist die Verwendung einer fixen Gegenkraft in Form eines Gegengewichts, um die Differenzen bei der Belastung auf den Draht zu verringern. Je höher die fixe Gegenkraft, desto stabiler bleibt das Gesamtsystem. Während im Prototyp I eine Feder eingesetzt wurde, die die Drahtspannung mit steigender Dehnung erhöht, führte dies zu einer Verschiebung der Temperatur-Schaltpunkte während des Schaltvorgangs selbst. Im Prototyp II wurde diese Feder durch ein Gegengewicht ersetzt, welches die Drahtspannung weitgehend konstant hält. Die Masse des Gegengewichts sollte die übrigen Lasten, die auf den Draht wirken deutlich übersteigen um eine möglichst hohe Stabilität des Systems zu gewährleisten.

Als größte Unsicherheit zur Bemessung des FGL-Drahts zählt die Reibungskraft des Aktor- und des Standard-Verschaltungssystems. Für letzteres wurden Zugversuche am Großdemonstrator durchgeführt (siehe Abbildung 32). Dabei sind zwei verschiedene Reibungsszenarien dargestellt worden.

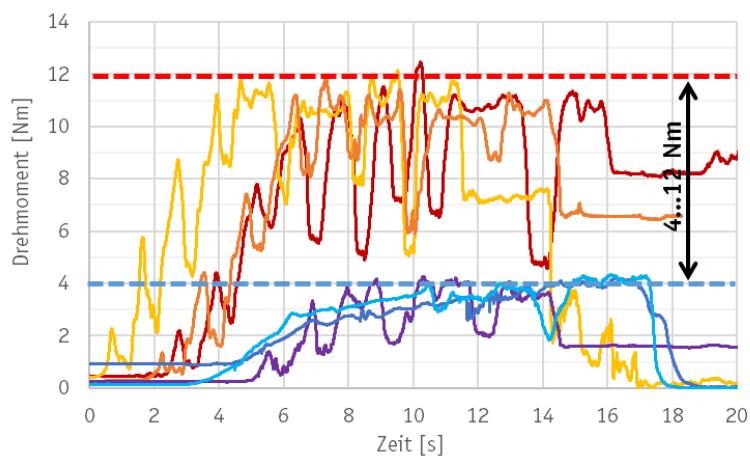


Abbildung 32: Messung des Drehmoments des Standard-Verschattungssystems mit verschiedenen Reibungswiderständen mit Versuchsaufbau (links) und Messergebnisse (rechts)

Ausgehend von einem Wellendurchmesser  $d=63$  mm ergibt sich für den untersuchten reibungsarmen Fall eine Losbrechkraft von  $F_{\max} = 4,0 \text{ [Nm]} / 0,0315 \text{ [m]} = 127 \text{ [N]}$ . Als Gegengewicht wurde zunächst eine Totlast von  $F_{\text{gegen}} = 15 \text{ [kg]} * 9,81 \text{ [m/s}^2] = 147 \text{ [N]}$ .

## II.1.6 Arbeitspaket K3: Algorithmenvalidierung, -weiterentwicklung und -programmierung

Im Arbeitspaket K3 erfolgte die Zusammenführung der theoretischen Ergebnisse aus Untersuchungen der verschiedenen Parameter sowie deren Verknüpfung aus den Arbeitsschritten K2.1 bis K2.6. Das Primäre Ziel von K3 ist die Bemessung der im Projekt hergestellten Prototypen des SmartSkinReal-Verschattungssystems sowie die Übertragung dieser Bemessungsergebnisse aus anderen Geometrien, Ausrichtungen, Standorte und Randbedingungen. Ferner erfolgte die Überprüfung der Funktionalitäten und der Dauerlauffähigkeit der Demonstratoren sowie die messtechnische Erfassung von Parametern und deren Auswertung. Im Ergebnis konnte der Prototyp II im Wesentlichen die gestellten Anforderungen erfüllen.

### **Arbeitspunkt K3.1 (HTWK) Energetische und bauphysikalische Auslegung basierend auf entwickelten Algorithmen; Bewertung Auslegungsprozesse; Darstellung Optimierungsbedarf; Weiterentwicklung Algorithmen**

Im Arbeitspaket K3.1 wurden theoretische Untersuchungen zur Verschattung von Räumen und Solarkollektoren durchgeführt. Dazu wurden thermische Simulationen des Solarkollektors und des zu verschattenden Raumes in Abhängigkeit des Sonnenstandes erstellt. Durch die Simulationen konnten Aussagen über die Temperaturentwicklung im Raum und am Solarkollektor unter verschiedenen Bedingungen, wie Einstrahlung und Einbauort, getroffen werden. Die Simulationen ermöglichten es, die Auswirkungen von verschiedenen Verschattungsszenarien auf die Temperatur im Raum und am Solarkollektor zu untersuchen und zu optimieren.

Die Ergebnisse der Simulationen wurden analysiert, um Zusammenhänge zwischen dem Einbauort, dem Sonnenstand und den thermischen Eigenschaften zu untersuchen. Dazu wurden die Ergebnisse der Simulationen auf ihre Abhängigkeit vom Einbauort und der Sonneneinstrahlung hin untersucht. Es wurden verschiedene Parameter wie beispielsweise die Temperatur, die Wärmeverluste und die Einstrahlung gemessen und analysiert. Anhand der Ergebnisse wurden vereinfachte Gleichungen entwickelt, welche den erforderlichen Draht-Temperaturbereich als Funktion definieren und somit die Grundlage für die Steuerung des SmartSkinReal-Systems bilden. Durch die Analyse der Ergebnisse konnten Zusammenhänge zwischen Einbauort, Sonnenstand und thermischen Eigenschaften des zu verschattenden Raums sowie des Solarkollektors aufgezeigt werden.

Die entwickelten Gleichungen dienen dazu, den Draht-Temperaturbereich im SmartSkinReal-System in Abhängigkeit von Einstrahlung und Ort zu definieren. Eine solche Gleichung könnte z.B. lauten:  $T_{\text{draht}} = f(\text{Einstrahlung}, \text{Ort})$ . Hierbei stellt  $T_{\text{draht}}$  die erforderliche Temperatur des Drahtes im SmartSkinReal-System dar und Einstrahlung sowie Ort sind als Parameter in die Funktion eingeflossen. Das entwickelte Programm aus AP K3.1 dient zur Berechnung des Schalt-Temperaturbereichs des SmartSkinReal-Systems und gibt diesen als Ausgabe aus. Es basiert auf den vereinfachten Gleichungen, die im Rahmen der bauphysikalischen Untersuchungen entwickelt wurden und berücksichtigt dabei den Einbauort und den Sonnenstand als Parameter. Das Programm verwendet eine grafische

Benutzeroberfläche (GUI), die dem Nutzer die Eingabe der Parameter erleichtert und die Ergebnisse übersichtlich darstellt. Der Nutzer kann den Einbauort und den Sonnenstand auswählen und das Programm berechnet daraufhin den erforderlichen Schalt-Temperaturbereich des SmartSkinReal-Systems. Das Programm wurde in der Programmiersprache Python entwickelt und nutzt verschiedene Bibliotheken wie beispielsweise NumPy und Matplotlib zur Berechnung und Darstellung der Ergebnisse. Es ist so konzipiert, dass es leicht erweiterbar ist und weitere Parameter wie beispielsweise die Materialien des zu verschattenden Raums oder des Solarkollektors in zukünftigen Versionen berücksichtigt werden können.



Abbildung 33: Benutzeroberfläche des SmartSkinReal Auslegungstools mit Eingabe von Ort- und Positions値en und Ausgabe der Schalttemperaturen

### **Arbeitspunkt K3.2 (ABS) Konstruktive Auslegung und Fertigungskonzeption basierend auf entwickelten Ablaufschemata; Optimierungsprozess; verschattungsseitige Mitwirkung bei Programmierung des Tools**

Das Arbeitspaket K3.2 befasste sich mit der experimentellen Validierung der gesetzten Anforderungen und der Validierung des entwickelten Aktors und der Mechanik des SmartSkinReal-Verschattungssystems.

Im Rahmen der Validierung der Aktormechanik sind verschiedene Aspekte untersucht worden, um die Funktionalität des Aktors sicherzustellen. Eine wichtige Kenngröße ist die Geschwindigkeit des Aktors, da diese maßgeblich die Geschwindigkeit der Verschattung beeinflusst. Hierbei sollten verschiedene Geschwindigkeiten getestet werden, um sicherzustellen, dass der Aktor schnell genug arbeitet, um den Raum effektiv zu verschatten, aber auch langsam genug, um eine sanfte und gleichmäßige Bewegung zu gewährleisten. Insbesondere der Solarbetrieb ohne elektrische Aktivierung des FGL-Drahts ist durch eine sehr langsame Geschwindigkeit geprägt. Je nach Intensität der solaren Einstrahlung dauert ein Schließvorgang bis zu einer Stunde, während der Schließvorgang mit elektrischer Aktivierung nach wenigen Sekunden abgeschlossen ist. Der Prozess der Öffnung des Verschattungssystems ist stark von der Temperatur abhängig. Bei hohen Außenlufttemperaturen von > 28 °C und schattiger Fassadenfläche dauert der Vorgang bis zur vollständigen Öffnung > 1 h. Eine zukünftige Optimierung des Solarkollektors sollte in Richtung einer verbesserten thermischen Leistungsfähigkeit und erhöhten Reaktionszeit untersucht werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Genauigkeit und die Wiederholungsgenauigkeit der Positionierung. Hierbei geht es darum, sicherzustellen, dass der Aktor die Jalousie präzise und zuverlässig in der gewünschten Position halten kann. Als Stufen wurden 0°, 45° und 90° definiert. Die entwickelte

Kurvenschibe des Prototyp II ermöglicht eine relativ stabile Position der drei Winkelstellung, jedoch keine Fixierung. Versuche die Winkelstufe der Lamellen über die Einstellung einer konstanten Stromspannung zu realisieren ließ sich in der Praxis nicht umsetzen. Auch eine fixe Rastung des Sonnenschutzes konnte nicht umgesetzt werden. Die erprobten mechanischen Lösungen mittels Magnetbolzen haben sich als ungeeignet herausgestellt.

Zudem ist die Zuverlässigkeit der Mechanik und der Aktormechanik ein wichtiger Aspekt, um eine dauerhafte und störungsfreie Funktion des Verschattungssystems zu gewährleisten. Hier wurden verschiedene Tests durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Mechanik des Aktors unter verschiedenen Bedingungen zuverlässig arbeitet. Dazu gehörten z.B. Tests unter hohen bzw. niedrigen Temperaturen oder bei feuchten Bedingungen. Die zum größten Teil aus dem Standard-System SolarFin des Herstellers Colt bestehenden Standardkomponenten zeigten eine hohe Dauerlauffähigkeit und Zuverlässigkeit. Die Aktormechanik erfüllt prinzipiell die geforderten Aufgaben, für die zukünftige Weiterentwicklung des Systems ist eine Obmierung des Materialeinsatzes und der Materialauswaltung erforderlich. Die z.T. 10 mm starken Bleche aus Edelstahl können wirtschaftlich für eine erste Kleinserie nicht angewendet werden. Vielmehr sollten die Bauteile des Aktors stärker in die eigentlichen Profile des Standard-Verschattungssystems integriert werden um statische Doppelstrukturen zu vermeiden und einen wirtschaftlicheren Aufbau zu entwickeln.

Mit gewissen Optimierungspotenzialen konnte eine technische Funktionalität des Systems nachgewiesen werden. Die geplante standardisierte Umsetzung der Fertigungsprozesse ließ sich aufgrund des realisierten Prototypenstatus und nicht umsetzen. Die gefertigten Bauteile der prototypischen Aktoren waren auf eine möglichst hohe Flexibilität hinsichtlich der Umbaubarkeit einzelner Komponenten ausgelegt.

### Arbeitspunkt K3.3 (IngP) Fertigungsoptimierte Auslegung FGL-Grundmaterial basierend auf entwickelten Ablaufschemata; Optimierungsprozess; materialseitige Mitwirkung bei Programmierung Tool

Das in ein Tool überführte Modell wurde für unterschiedliche Legierungen und Umgebungsmedien validiert, s. Abbildung 34.

ERGEBNISSE		
<b>Bestromungsparameter, um die Temperatur <math>\theta_x</math> in der Zeit <math>t</math> zu erreichen</b>		
Aktivieren		
el. Leistung	$P_{el}$	8,042640608 W
el. Spannung	$U$	6,371842508 V
Strom	$I_{el}$	1,26221585 A
<b>Temperatur halten</b>		
el. Leistung	$P_{el}$	7,047967213 W
el. Spannung	$U$	5,964824075 V
Strom	$I_{el}$	1,181589447 A
EINGABE		
<b>Eingabewerte</b>		
<b>Randbedingungen</b>		
Umgebungstemperatur	$\theta_u$	22 °C
Zieltemperatur	$\theta_x$	100 °C
Bestromungszeit	$t$	5 s
<b>Geometrie</b>		
Drahtdurchmesser	$d$	0,25 mm
Drahtlänge	$l$	280 mm
<b>Materialkenndaten</b>		
Dichte	$\rho$	6,45 g/cm³
spez. Wärmekapazität	$C_p$	0,45 J/(g·K)
spez. Umwandlungsenthalpie	$\Delta h$	21 J/g
Clausius-Clapeyron	$k_{\text{eff}}$	8 MPa/K
Emissionsgrad	$\epsilon_{\text{eff}}$	0,7
Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma_0$	5,67E-14 W/(mm²·K⁴)
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	50 W/m·K
spezif. elektr. Widerstand bei $T_u$	$\rho_u$	9,40E-04 Ω·mm
spezif. elektr. Widerstand bei $T_x$	$\rho_x$	8,30E-04 Ω·mm
Medium	Silikonöl Alltec Dropplate (links)	
Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha$	0,000410897 W/m²K
<b>Bestromungsparameter, um die Temperatur <math>\theta_x</math> mit Strom <math>I_{el}</math> zu erreichen</b>		
Aktivieren		
el. Leistung	$P_{el}$	20,92560588 W
el. Spannung	$U$	10,096280294 V
Bestromungszeit	$t$	0,378358374 s
<b>Aktorperformance (Draht)</b>		
Daten		
Aktorkraft	$F$	58,904862255 N
Aktorhub	$\delta$	3,000000000 mm
Mechanische Arbeit	$Q_m$	0,176714587 J
Clausius-Clapeyron	$k_{\text{eff}}$	0,636619772 kN
Rel. PUT-Verschiebung		37,5 K
Wirkungsgrad	$\eta$	0,803248122 %

Abbildung 34: Toolauschnitt zur Bestimmung der Bestromungsparameter und Aktorperformance.

Die Simulationen mit dem erstellten Modell belegen, dass die erforderliche Bestromungszeit eines FGL-Drahtes in Silikonöl signifikant zur Bestromungszeit des FGL-Drahtes in Luft zunimmt. Diese Beobachtung wurden auch experimentell ermittelt, s. Abbildung 35.

Elektrische Leistung zur Erreichung einer Zieltemperatur von 100 °C in 5 s. Ausgangstemperatur 20 °C

Luft		Silikonöl Kyro 20	
Aktivieren		Aktivieren	
el. Leistung	$P_{el}$	1,759850386W	
el. Spannung	$U$	2,980599165V	
Strom	$I_{el}$	0,590435107A	

Zeit zur Erreichung einer Zieltemperatur von 100 °C für einen Strom von 2 A.. Ausgangstemperatur 20 °C

Luft		Silikonöl Kvro 20	
Aktivieren		Aktivieren	
el. Leistung	$P_{el}$	20,192560588W	
el. Spannung	$U$	10,096280294V	
Bestromungszeit $t$		0,255997775s	0,492709219s

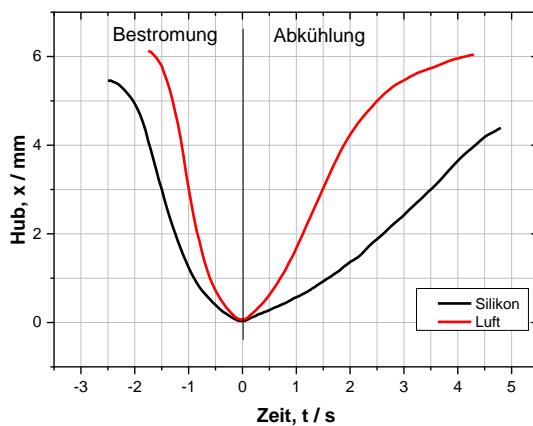


Abbildung 35: Exemplarische Simulationstests und Versuche zur Validierung des Modells.

### Arbeitspunkt K3.4 (BWO) Konstruktive Darstellung der Details zur Bauintegration aller Systembestandteile und Versorgungsdimensionierung basierend auf entwickelten Ablaufschemata; Optimierungsprozess; baukonstruktionsseitige Mitwirkung bei Programmierung Tool

Das eigens entwickelte Carbonbeton-Doppelwandsystem mit zwischenliegender Wärmedämmung (Thermowand) wurde im Rahmen des Projekts durch eine bauliche Integration des SmartSkinReal-Verschattungssystems erweitert, wie sie im Betonfertigteilbau üblich sind. Hierfür wurden Standard-Befestigungselemente 4x M10 Gewindegürtel, a=b=8 cm für die Befestigung von Winkelprofilen an der äußeren Carbonbetonplatte des Halbfertigbauteils vorgesehen. Für die Bemessung der Verankerungslösung sind das Eigengewicht des Verschattungssystems (Konsollast) und die Windsoglast (Dübelauszug) zu kombinieren. Die Anzahl der Befestigungspunkte richtet sich nach dem Gewicht bzw. nach der Größe des Verschattungssystems. Für die im Projekt verwendete Standardbreite sind vier Befestigungspunkte ausreichend. Bei größeren zu verschattenden Flächen und/oder deutlich höheren Windsoglasten können zusätzliche Befestigungspunkte erforderlich werden.

Eine Integration der Bemessungsdaten der entwickelten Thermowand wurde untersucht. Jedoch hat sich gezeigt, dass eine Übertragung der Geometrie der Wand keinen Mehrwert für das geplante SSR-Auslegungstool bietet.

## **Arbeitspunkt K3.5 (CAV) Bedarfssteuerungsauslegung basierend auf entwickelten Ablaufschemata; Optimierungsprozess; steuerungsseitige Mitwirkung bei Programmierung Tool**

Im Rahmen von K3.5 wurde eine Benutzeroberfläche für die Steuerung des SmartSkinReal-Verschattungssystems konzeptionell entwickelt. Diese ermöglicht es dem Nutzer, das System manuell oder automatisch zu steuern. Die Benutzeroberfläche wurde so gestaltet, dass sie intuitiv und benutzerfreundlich ist, so dass auch Nutzer ohne spezielle Fachkenntnisse das System einfach und zuverlässig bedienen können. Im manuellen Modus kann der Nutzer die Verschattung direkt steuern, indem er die Position der Lamellen oder Jalousien über die Benutzeroberfläche verändert. Im automatischen Modus wird die Steuerung des Systems durch die thermische Aktivierung im Solarkollektor übernommen und das System passt sich den jeweiligen Umgebungsbedingungen automatisch an (Abbildung 36). Über ein Einstellungssymbol können im BUS-System die jeweiligen Verschattungseinheiten der Steuereinheit zugewiesen werden.

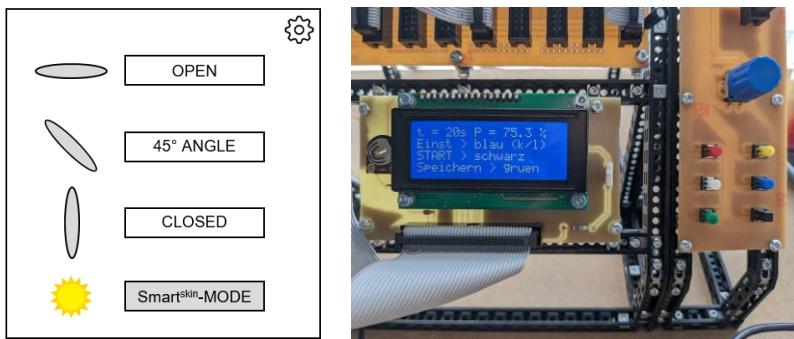


Abbildung 36: Touch user interface (TUI) zur Steuerung des SmartSkinReal-Verschattungssystems (links) und prototypische Steuerung (rechts)

Da im Rahmen des Projekts keine mechanische Lösung zur Rastung der verschiedenen Winkelstufen des SmartSkinReal-Verschattungssystems entwickelt werden konnte, wurde die Steuereinheit lediglich auf theoretischer Ebene umgesetzt. Die Prototypische Steuerung als variable Bestromung mittels Pulsen ermöglicht die Aktivierung des Sonnenschutzes durch thermisch-elektrische Erwärmung des Drahts. Bei dauerhaftem Anliegen einer Spannung ließe sich auch mithilfe der Prototypischen Steuerung ein dauerhaftes Schließen der Verschattung einstellen. Der dabei dauerhafte Stromverbrauch zur Erwärmung des FGL-Drahts steht jedoch entgegen zu den Projektzielen zur Entwicklung einer möglichst energieautarken Verschattung.

## **Arbeitspunkt K3.6 (TUC) FGL-Aktorseitige Auslegung basierend auf entwickelten Ablaufschemata; Optimierungsprozess, aktorseitige Mitwirkung bei Programmierung Tool**

Die Reibung führt zu Energieverlusten und verringert die Effizienz der dynamischen Systeme. Ein Ansatz zur Verringerung der Reibung ist die Verwendung von Schmiermitteln. Obwohl die Verwendung von Schmiermitteln ein gängiger Ansatz zur Reibungsreduzierung ist, gibt es Situationen, in denen dies nicht möglich oder praktisch nicht umsetzbar ist. So können Schmiermittel unter bestimmten

Betriebsbedingungen, etwa bei hohen Temperaturen oder im Vakuum, verdampfen oder sich zersetzen. Außerdem können bei einigen mechanischen Systemen die Kontaktflächen aufgrund konstruktiver Einschränkungen nicht getrennt werden, so dass der Einsatz von Schmiermitteln nicht möglich ist. In solchen Fällen können andere Methoden, wie z. B. die Verringerung der Belastung des Systems oder die Verwendung von Materialien mit niedrigem Reibungskoeffizienten, besser geeignet sein. Eine andere Methode ist die Verwendung von Komponenten mit niedrigem Reibungskoeffizienten, wie z. B. Lagern, die die Reibung in mechanischen Systemen wirksam verringern können.

Der letzte Schwerpunkt dieses Projekts sind die Auswirkungen der Reibung auf das Energiemanagement. Die Reibungskräfte wurden zu  $76N$  gemessen. Durch den Einsatz der Kugellager werden die Reibungskräfte minimiert und die notwendige Kraft zum Bewegen der Lamellen reduziert sich somit zu  $350\text{ N}$ . Ein weiterer wichtiger Punkt, der erwähnt werden sollte, ist das Potenzial zur Verringerung des Durchmessers der FGL. Im aktuellen Kontext die Reduzierung des Durchmessers der FGL führt zu einer kleineren Energiezufuhr, wodurch das System kostengünstiger wird. Außerdem hat ein kleinerer FGL-Durchmesser schnellere Aktivierungszeiten und eine bessere Kontrolle über die Energiespeicherung und -abgabe. Die Aktivierung der FGL bei niedrigeren Temperaturen hat erhebliche Auswirkungen auf das Energiemanagement. Diese Möglichkeit kann das System effizienter machen und die zur Aktivierung der Eigenschaften des Drahtes erforderliche Energie verringern. Durch die Verwendung niedrigerer Temperaturen in dem Kollektor ist es auch möglich, die Lebensdauer der FGL zu verlängern und das Risiko einer Beschädigung des Systems zu verringern.



Abbildung 37: Optimale Lamellenteile zur Reduzierung der Reibung

## II.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Neben den Aufwendungen für Personal und Dienstreisen wurden Investitionen in Materialien, Messtechnik und Standardbauteile getätigt. Ferner wurde ein Unterauftrag mit programmierspezifischen Leistungen vergeben.

Tabelle 3: Erteilte Unteraufträge

Unterauftragnehmer	Leistung
<b>Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.</b>	Programmierleistungen

## II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Investitionen in das Vorhaben SmartSkinReal waren notwendig und angemessen, da es sich um ein innovatives und zukunftsweisendes Projekt handelt, das eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der intelligenten Gebäudehüllen bietet. Die SmartSkinReal-Technologie bietet eine Möglichkeit, die Energieeffizienz von Gebäuden zu erhöhen und damit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren. Die Integration von intelligenten Sensoren und Aktoren in die Gebäudehülle ermöglicht eine optimierte Steuerung von Licht und Wärme und trägt somit zur Schaffung eines gesünderen und komfortableren Innenraumklimas bei.

Darüber hinaus bietet SmartSkinReal ein hohes Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Gebäudetypen und -anforderungen. Die Verwendung von FGL-Materialien eröffnet zudem neue Möglichkeiten in Bezug auf Design und Architektur von Gebäuden.

Insgesamt bietet das Vorhaben SmartSkinReal ein großes Potenzial für die Zukunft der Gebäudetechnologie und die Investitionen waren notwendig, um diese Technologie zu entwickeln, zu testen und auf den Markt zu bringen.

Das Vorhaben war ein Forschungsprojekt, das darauf abzielte, innovative Technologien und Materialien für die Entwicklung von intelligenten Gebäudehüllen zu erforschen und zu entwickeln. Es handelte sich um ein sehr ambitioniertes und komplexes Projekt, das viel Forschungsarbeit erforderte und mit erheblichen Risiken verbunden war. Die Kosten für die notwendige Infrastruktur, das Personal und die Materialien waren daher sehr hoch. Da es sich um ein sehr spezialisiertes und risikoreiches Projekt handelte, war es für private Investoren nicht attraktiv genug, um das nötige Kapital zu investieren. Zudem könnten die potenziellen Gewinne erst nach vielen Jahren oder sogar Jahrzehnten realisiert werden. Daher war es notwendig, dass das Projekt durch öffentliche Mittel finanziert wurde, um sicherzustellen, dass es trotz der hohen Risiken und der langfristigen Ausrichtung durchgeführt werden konnte.

## II.4 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens

Das Vorhaben SmartSkinReal kann voraussichtlich mehrere förderpolitische Ziele unterstützen. Zum einen kann es zukünftig zur Förderung von Forschung und Entwicklung beitragen, da es eine innovative und technologisch anspruchsvolle Lösung zur Überwachung von Gebäuden und Strukturen darstellt. Zum anderen kann das Vorhaben dazu beitragen, die Energieeffizienz von Gebäuden und damit die Erreichung der Klimaziele zu verbessern, da es eine Reduzierung des Kühlenergiebedarfs und eine Steuerung der Raumlufttemperatur ermöglicht. Ferner kann die Anwendung der entwickelten SmartSkinReal-Technologie den Hilfsenergiebedarf für die Verschattung deutlich senken. Darüber hinaus könnte das Vorhaben auch zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft beitragen, da es eine neue Technologie mit hohem Marktpotenzial darstellt, die auch exportfähig ist.

Die beteiligten Universitäten TU Chemnitz und HTWK Leipzig könnten aus dem SmartSkinReal-Projekt mehrere Vorteile ziehen. Zum einen könnten sie ihre Forschungs- und Entwicklungskompetenzen in den Bereichen intelligente Materialien, Sensorik, Aktorik, Maschinenbau und Bauphysik sowie Embedded Systems erweitern und vertiefen. Durch die enge Zusammenarbeit mit Industriepartnern könnten sie außerdem wertvolle Erfahrungen im Bereich der anwendungsorientierten Forschung sammeln und ihr Know-how in die industrielle Praxis transferieren. Ein weiterer Vorteil für die beteiligten Universitäten liegt in der Erhöhung ihrer Sichtbarkeit und

Reputation. Durch die Teilnahme an einem Projekt mit hohem Innovations- und Zukunftspotenzial könnten sie sich zukünftig als Vorreiter in den genannten Forschungsbereichen positionieren und dadurch ihre Attraktivität für potenzielle Partner aus Industrie und Forschung steigern. Neben diesen wissenschaftlichen und reputationsbezogenen Vorteilen könnten die beteiligten Universitäten auch finanziell profitieren. Durch die Einwerbung von Forschungsgeldern und Fördermitteln konnten sie Einnahmen generieren und ihre langfristige Finanzierung sicherstellen.

Die beteiligten Unternehmen ABS Storkow GmbH, IngPuls GmbH, Betonwerk Oschatz GmbH und Cavertitzer Elektromontagen GmbH konnten aus dem SmartSkinReal-Projekt mehrere Nutzen ziehen. Zunächst können sie durch die Zusammenarbeit mit den anderen Unternehmen und Forschungseinrichtungen neue Netzwerke aufbauen und dadurch potenzielle neue Geschäftspartner oder Kunden finden. Durch die Entwicklung neuer Materialien und Produkte könnten die Unternehmen auch ihr Portfolio erweitern und somit ihre Wettbewerbsfähigkeit erhöhen. Zudem könnten die entstehenden Technologien und Produkte für neue Anwendungsgebiete und Märkte genutzt werden, was zu einem zusätzlichen Wachstumspotenzial für die beteiligten Unternehmen führen könnte. Darüber hinaus könnten die beteiligten Unternehmen auch Zugang zu neuen Technologien und wissenschaftlichen Erkenntnissen erhalten, die für ihre eigenen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten nützlich sein könnten. Insgesamt könnte das Projekt dazu beitragen, dass die beteiligten Unternehmen in ihrer Branche als innovativ und zukunftsorientiert wahrgenommen werden.

## II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit keine weiteren Projekte und Unternehmen bekannt geworden, die sich mit Sonnenschutzsystemen auf Basis von FGL-Aktoren beschäftigen.

Begrenzt vergleichbare Systeme betreffen smarte Fenster, die auf FGL-Materialien basieren und sich elektrisch aktivieren lassen. Dies wird durch sogenannte elektrochrome Folien erreicht. Diese Folien bestehen aus mehreren Schichten, darunter eine Elektrode, eine Ionenleiterschicht und eine Elektrochromschicht. Wenn ein elektrisches Feld angelegt wird, wandern Ionen durch die Ionenleiterschicht in die Elektrochromschicht. Diese Schicht enthält elektrochemisch aktive Materialien, die ihre Farbe verändern, wenn sie mit den Ionen interagieren. Durch die Steuerung des angelegten elektrischen Feldes kann die Menge an Ionen, die durch die Ionenleiterschicht wandern, kontrolliert werden, was die Intensität der Farbveränderung in der Elektrochromschicht beeinflusst. Dadurch kann die Transparenz der Scheibe gesteuert und somit eine automatische Tönung erreicht werden.

Ferner untersuchen verschiedene Publikationen die Effekte der Verschattung durch statische Photovoltaik-Anlagen. Die Verschattung durch PV-Anlagen kann dazu beitragen, die Verdunstung von Wasser zu reduzieren und damit den Wasserhaushalt von Freiflächen zu verbessern. Dadurch kann die Vegetation gestärkt und die Biodiversität erhöht werden. Zudem können PV-Anlagen als Schutz vor Witterungseinflüssen wie Starkregen und Hagel dienen und somit zur Erhaltung von Gebäuden und anderen Bauwerken beitragen.

## II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Bisher wurde keine Publikation erstellt, aber es ist geplant, eine auf Grundlage dieses Berichts zu veröffentlichen. Wir konnten noch keine Ergebnisse veröffentlichen, da wir auf die Fertigstellung der finalen Aktorkonstruktion und die damit verbundenen endgültigen Ergebnisse gewartet haben.

## Anhang B: Berichtsblatt Deutsch

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Zwanzig20 – smart <sup>3</sup> - Verbundvorhaben – SmartSkinReal – Entwicklung und Monitoring eines Verschattungssystems mit FGL-Steuerung; TP:5 Entwicklung der Bedarfssteuerung	
4. Autor (en) [Name(n), Vorname(n)] Stelzmann, Mario; Zakner, Felix; Schreier, Markus; Navarro de Sosa, Inaki; Schurig, Matthias; Syga, Kai; Nemati, Amir	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2022
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Cavertitzer Elektromontage GmbH Auf dem Berg 3 04758 Cavertitz	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03ZZ1042K
	11. Seitenzahl 45 zzgl. Anlage
12. Fördernde Institution(en) (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 5
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 38
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung SmartSkinReal war ein Forschungsprojekt, das sich mit der Entwicklung eines innovativen, automatischen Verschattungssystems für Gebäude beschäftigte. Das System nutzt Drähte aus Formgedächtnislegierungen (FGL) als Aktorenantrieb, die eine präzise und geräuschlose Bewegung des Verschattungssystems ermöglichen. Ein thermischer Solarkollektor regelt die Verschattung in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen wie Sonnenstand, Temperatur und Sonnenstrahlungsintensität. Das System zeichnet sich durch hohe Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit aus, da es den Energieverbrauch zur Kühlung reduziert und damit Kosten spart. Die Ergebnisse des Projekts umfassen die Entwicklung eines funktionsfähigen Prototyps, die Validierung der technischen Leistungsfähigkeit und die Bewertung der wirtschaftlichen Aussichten.	
19. Schlagwörter Sonnenschutz, Formgedächtnislegierung, Energie, autark	
20. Verlag	21. Preis

## Anhang C: Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title Zwanzig20 - smart <sup>3</sup> - Joint Project - SmartSkinReal - Development and Monitoring of a Shading System with FGL Control; WP5: Development of demand management	
4. author(s) (family name, first name(s)) Stelzmann, Mario; Zakner, Felix; Schreier, Markus; Navarro de Sosa, Inaki; Schurig, Matthias; Syga, Kai; Nemati, Amir	5. end of project 31.12.2022
	6. publication date
	7. form of publication final report
8. performing organization(s) (name, address) Cavertitzer Elektromontage GmbH Auf dem Berg 3 04758 Cavertitz	9. originator's report no.
	10. reference no. 03ZZ1042K
	11. no. of pages 45 plus attachments
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 5
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 38
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract SmartSkinReal was a research project that focused on the development of an innovative, automatic shading system for buildings. The system uses wires made of shape memory alloys (FGL) as actuator drives, which enable precise and noiseless movement of the shading system. A thermal solar collector regulates the shading depending on external influences such as sun position, temperature, and solar radiation intensity. The system is characterized by high energy efficiency and cost-effectiveness as it reduces energy consumption for cooling and saves costs. The results of the project include the development of a functional prototype, the validation of the technical performance, and the assessment of economic prospects.	
19. keywords Sunscreen, shape memory material, energy, energy autonomous	
20. publisher	21. price