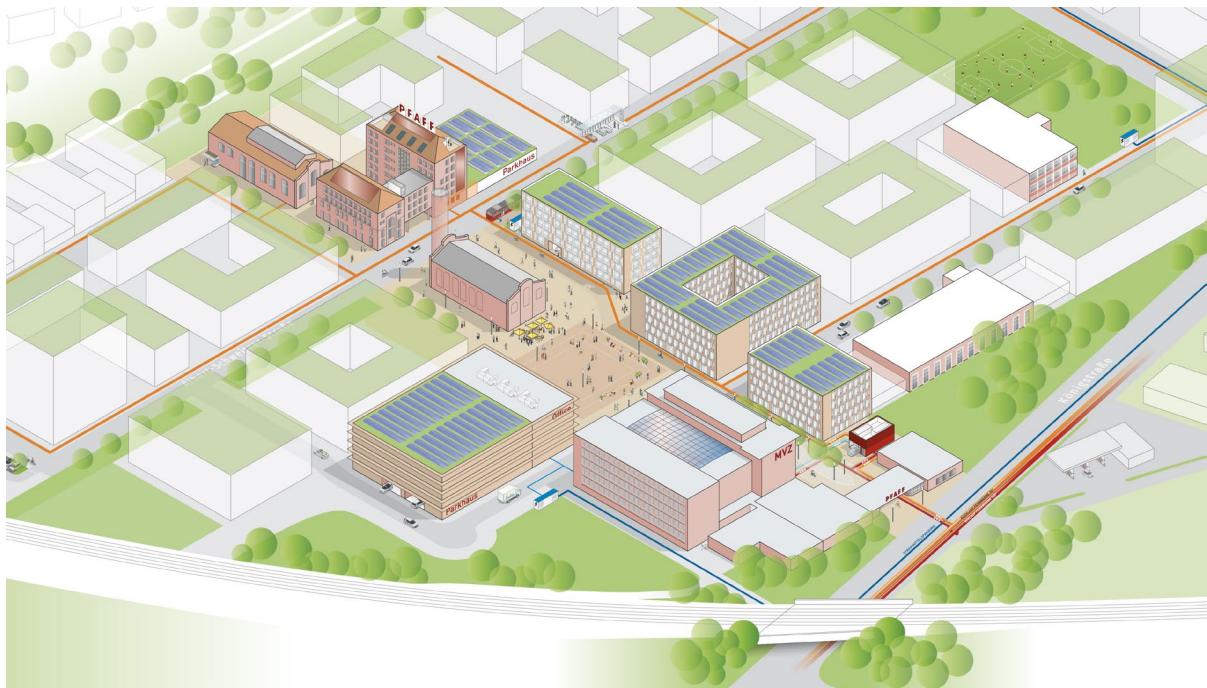


Forschungsbericht

Ersatz der elektrochromen Verglasung im MVZ durch eine alternative Fensterlösung

Begründung und Kostenschätzung

Forschungsbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts
zum Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff
„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern“



< Forschungsbericht

Ersatz der elektrochromen Verglasung im MVZ durch eine alternative Fensterlösung

Begründung und Kostenschätzung >

Forschungsbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts zum Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff:

„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern - Integrierte Konzepte, innovative Technologien und sozialwissenschaftliche Forschung im Leuchtturm für klimaneutrale Quartiere“

Teilvorhaben EnStadt:Pfaff: „IfaS Lebenszyklusbetrachtung“

Förderndes Ministerium:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Projektträger:	Forschungszentrum Jülich GmbH
Förderkennzeichen:	03SBE112H
Projektlaufzeit:	01.10.2017 – 31.12.2024
Autoren:	Johannes Dietz (IfaS), Christian Persohn (IG-CP), Johannes Eisenlohr Gerhard Stryi-Hipp (ISE)
Ausführende Stelle:	Hochschule Trier - Trier University of Applied Sciences - Umwelt-Campus Birkenfeld - Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS)
Veröffentlicht:	April 2020

Die Verantwortung der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Verbundprojekt EnStadt:Pfaff wurde von 8 Partnern durchgeführt und als Leuchtturmpunkt gemeinsam gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Weitere Informationen zu EnStadt:Pfaff: <https://pfaffquartier-klimaneutral.de/>

Ersatz der elektrochromen Verglasung im MVZ durch eine alternative Fensterlösung – Begründung und Kostenschätzung

Ursprünglich vorgesehene elektrochrome Verglasung

Aufgrund des hohen Fensterflächenanteils und der Orientierung des Gebäudes bilden die solaren Gewinne beim medizinischen Versorgungszentrum (MVZ) einen dominanten Faktor. Dem sommerlichen Wärmeschutz kommt entsprechend große Bedeutung zu. Dieser sollte laut Vorhabenbeschreibung mit elektrochromer Verglasung realisiert werden. Im Verlauf des Planungsprozesses musste dieser Ansatz jedoch aufgrund folgender Faktoren aufgegeben werden.

- Die vom Denkmalamt geforderte Fensterform (zweiflügelig, mit schmalem Rahmen) konnte mit diesem Glastyp nicht umgesetzt werden.
- Von Seiten des Denkmalamts gab es zudem Bedenken, dass sich die Tönung der Fenster zu stark auf die Optik der Fassaden auswirken könnte.
- Elektrochrome Gläser verändern die Lichtfarbe des Tageslichts im Innenraum. Bei einer medizinischen Nutzung kann dies zu Problemen führen. Im Fall des MVZ hatten diesbzgl. mehrere Ärzte Bedenken geäußert.

Da die elektrochrome Verglasung nicht umgesetzt werden kann, wurde nach alternativen Lösungen gesucht. Die Optionen waren hierbei durch die Anforderungen des Denkmalschutzes stark eingeschränkt. Alle Formen der Außenverschattung waren aufgrund der verbundenen Änderung der Fassadenoptik kategorisch ausgeschlossen. Systeme zur Innenverschattung sind zulässig, liefern jedoch keinen effektiven Sonnenschutz und führen in der Folge zu einem hohen Energieverbrauch für die Kühlung des Gebäudes. Diese Gründe hatten für die Verwendung der elektrochromen Verglasung gesprochen, bei der der Sonnenschutz in der Scheibenebene erfolgt durch deren stufenweise Tönung.

Alternativer Fensteraufbau mit guter Ökobilanz, innenliegender Jalousie und innovativer Steuerung

Einen ähnlichen Ansatz bilden Fenster mit Jalousien im Scheibenzwischenraum. Sie liefern einen sehr effektiven Sonnenschutz wie die klassische Außenverschattung mit Jalousie oder Markiese, sind aber optisch wesentlich unauffälliger. Nach langen Verhandlungen mit dem Denkmalamt wurde diese Lösung für das MVZ genehmigt. Ausschlaggebend waren die energetischen Vorteile: Der Kühlbedarf des Gebäudes kann mit dieser Lösung stark abgesenkt werden. Vor diesem Hintergrund wurden leichte Veränderungen der Fassadenoptik akzeptiert.

Neben dem Sonnenschutz muss die Verglasung beim MVZ auch hohe Anforderungen beim Wärme- und Schallschutz erfüllen. Die Anforderungen beim Wärmeschutz leiten sich aus dem hohen Energiestandard KfW 70 ab, der für das MVZ vorgesehen ist. Um dessen Anforderun-

gen zu erfüllen, dürfen die Fenster einen U-Wert von $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ nicht überschreiten. Die hohen Anforderungen beim Schallschutz bestehen aufgrund der Lärmbelastung durch die Bahnlinie in direkter Nachbarschaft und der Nutzung des Gebäudes als medizinisches Versorgungszentrum.

Ein weiteres Kriterium im Auswahlprozess bildet die Ökobilanz der verschiedenen Fenstervarianten. Mit einer Ökobilanz werden die ökologischen Auswirkungen über den kompletten Lebenszyklus eines Produktes erfasst. Bei der Gebäudesanierung werden bisher häufig nur die energetischen Einsparungen in der Nutzungsphase betrachtet. Eine ganzheitliche Bewertung erfordert aber nicht nur die Betrachtung der Produktion der Materialien sondern auch ihre Entsorgung bzw. ihr Recycling. Neben dem Energieverbrauch sollten zudem weitere Wirkungskategorien wie beispielsweise das Treibhauspotential und die Versauerung berücksichtigt werden.

In Zusammenarbeit mit der Firma Becker wurde ein Fenster entwickelt, das alle aufgeführten Anforderungen erfüllt. Die Basis bildet das Modell „Slimline 2Hv“, dass in Abbildung 1 dargestellt ist.



Abbildung 1: Fenster "Slimline 2Hv" der Firma Becker¹

Es handelt sich hierbei um ein Holzintegralfenster mit 2fach Verglasung und einer Jalousie im Scheibenzwischenraum. In Abhängigkeit von der für den Rahmen verwendeten Holzsorte kann bei diesem Modell ein U-Wert von bis zu $0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$ erzielt werden.

Bezogen auf das MVZ werden mit diesem Modell die Anforderungen des Denkmalschutzes und des sommerlichen Wärmeschutzes erfüllt. Die beim winterlichen Wärmeschutz und beim Schallschutz geforderten Niveaus werden jedoch nicht erreicht. Durch Einbau einer weiteren Glasscheibe, der Füllung des Scheibenzwischenraums mit dem Edelgas Krypton und einer speziellen Wärmeschutzbeschichtung können jedoch auch diese beiden Kriterien erfüllt werden. Der U-Wert des Fensters verbessert sich durch diese Maßnahme von $0,95$ auf $0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Die für das MVZ entwickelte Fensterlösung liefert die folgenden Vorteile:

- Mit der Jalousie im Scheibenzwischenraum kann die direkte Sonneneinstrahlung im Sommer stark reduziert werden. Dies liefert einen entscheidenden Beitrag zur Kühl-

¹ Vgl. Becker (Hrsg.), Broschüre „Slimline“, 2017, S. 5

lung des Gebäudes, bei minimalem Energieeinsatz. Der Energiebedarf für die zusätzliche aktive Kühlung wird in der Folge stark reduziert. Aufgrund der Positionierung der Jalousie im Scheibenzwischenraum ist diese Lösung im Fall des MVZ mit den Anforderungen des Denkmalschutzes vereinbar.

- Die Lamellen der Jalousie können neben dem Sonnenschutz auch für die Tageslichtlenkung verwendet werden. Hierbei werden die Lamellen im oberen Bereich des Fensters so ausgerichtet, dass das Tageslicht an die Decke des Innenraums und die dem Fenster gegenüberliegende Wand gelenkt wird. Durch diese Maßnahme wird eine gleichmäßige Ausleuchtung des Raums erzielt und damit der Bedarf an Kunstlicht deutlich reduziert. Die Tageslichtlenkung erfordert die unabhängige Steuerung der Lamellen der Jalousie in mindestens 2 Gruppen. Die obere Gruppe wird für die Lichtlenkung verwendet, die untere Gruppe für den Sonnen- und Blendschutz.
- Durch die Ergänzung einer weiteren Glasscheibe, die Füllung des Scheibenzwischenraums mit dem Edelgas Krypton und einer speziellen Wärmeschutzbeschichtung erfüllt die Verglasung die hohen Anforderungen, die beim MVZ an den winterlichen Wärmeschutz und den Schallschutz der Verglasung gestellt werden. Der U-Wert des Fensters verbessert sich durch diese Maßnahme von 0,95 auf 0,74 W/m²K. Die hohen Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz der Verglasung sind beim MVZ eine indirekte Folge des Denkmalschutzes. Die geschützten Fassaden können nicht von außen, sondern nur von innen gedämmt werden, mit entsprechenden Einschränkungen bei der Dämmstärke. Durch diese Dynamik wächst die Bedeutung der Verglasung für die thermische Qualität der Gebäudehülle. Diese Entwicklung wird zudem durch den hohen Fensterflächenanteil in den Fassaden verstärkt.
- Bei dem gewählt Fenstermodell von der Firma Becker handelt es sich um ein Integralfenster. Bei dieser Bauform verschmelzen der äußere Fensterrahmen und der innere Flügelrahmen zu einer optischen Einheit. Mit der resultierenden schlanken Rahmenoptik können im Fall des MVZ die Anforderungen des Denkmalschutzes erfüllt werden. Das Gebäude wurde in den 1950ern gebaut, mit schlanken Fensterrahmen, siehe Abbildung 2. Diese Optik soll bei der Sanierung weitgehend erhalten bleiben.



Abbildung 2: Ausschnitt der Straßenfassade von Hauptgebäude Ost

Integralfenster haben neben ihrer schönen Außenoptik aber auch energetische Vorteile. Aufgrund des größeren Anteils der Verglasung sind die Isolationswerte bei Integralfenstern besser als bei der klassischen Bauform. Bei modernen Fenstern hat das Glas einen besseren U-Wert als der Rahmen. Mit steigendem Glasanteil verbessert sich daher der U-Wert des gesamten Fensters. Der größere Anteil der Glasfläche verbessert zudem die Beleuchtung mit natürlichem Licht im Innenraum. In der Folge muss weniger Kunstlicht zugeschaltet werden.

- Bei dem ausgewählten Integralfenster wird der Rahmen vollständig aus Holz gefertigt. Diese Bauform wurde 2014 von der Firma Becker entwickelt. Bis zu diesem Zeitpunkt gab es Integralfenster mit Holzrahmen nur in Kombination mit einer Aluminium-Blende für den Witterungsschutz. Durch den Einsatz einer innovativen Multiholzkante kann beim Fenstermodell von Becker auf die Aluminiumblende verzichtet werden. Im Ergebnis verbessern sich die Außenoptik und die Ökobilanz des Fensters. Das Rahmenmaterial hat entscheidenden Einfluss auf die Ökobilanz eines Fensters. Um dies zu veranschaulichen, sind in Abbildung 3 die Ergebnisse einer vergleichenden Ökobilanz graphisch aufbereitet. Untersucht wurden Fensterflügelrahmen aus 3 verschiedenen Materialien: Holz, Aluminium und Kunststoff (PVC). Die Ergebnisse sind normiert, mit dem Holzrahmen als Referenz.

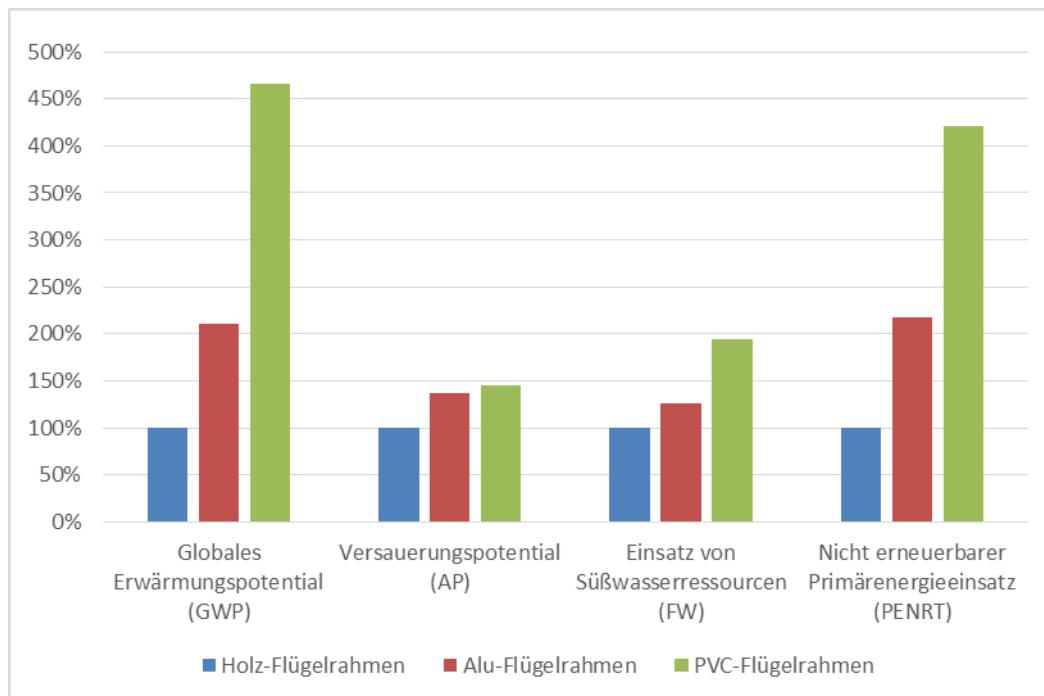


Abbildung 3: Ökobilanz verschiedener Fensterflügelrahmen, normiert

In allen 4 abgebildeten Wirkungskategorien zeigen sich klare Vorteile für den Fensterflügelrahmen aus Holz. Besonders ausgeprägt sind diese Vorteile in den Wirkungskategorien „Globales Erwärmungspotential (GWP)“ und „Nicht erneuerbarer Primärenergieeinsatz (PENRT)“. An zweiter Position liegen Fensterflügelrahmen aus Aluminium. Wird nur die Herstellung betrachtet, landen diese abgeschlagen auf dem letzten

Platz. Durch ihr hohes Recyclingpotential schieben sie sich jedoch bei einer Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus auf die zweite Position. Zu den Fensterflügelrahmen aus Holz verbleibt jedoch in allen 4 betrachteten Wirkungskategorien ein großer Abstand. Die für das MVZ gewählten Fensterrahmen aus Holz bilden daher aus ökobilanzieller Sicht die mit Abstand beste Option.

Kostenvergleich neue gegenüber ursprüngliche Fenstervariante

In Tabelle 1 sind die Kosten der für das MVZ entwickelten innovativen Fensterlösung aufgeführt. Die Basis bildet ein Angebot der Firma Becker, dass diesem Schreiben angefügt ist.

Tabelle 1: Kosten der Holzintegralfenster mit Jalousien im Scheibenzwischenraum

Angebot Firma Becker (netto)	1.705.612 €
Fensterzubehör	- 118.635 €
Kryptonfüllung Scheibenzwischenraum	+ 46.981 €
Steuerung Jalousien	+ 93.774 €
Planungs- und Nebenkosten nach HOAI	+ 86.279 €
Mehrwertsteuer (19%)	+ 344.662 €
Gesamtkosten (brutto)	= 2.158.673 €

Um die Mehrkosten der innovativen Verglasung zu ermitteln, wurde ein zweites Angebot eingeholt, ebenfalls von der Firma Becker. Bei diesem Angebot wird die Verglasung des MVZ mit gewöhnlichen Fenstern realisiert, mit entsprechend niedrigeren Kosten. Auch dieses Angebot ist dem Schreiben angefügt. In Tabelle 2 werden die Kosten der beiden Verglasungsvarianten gegenüberstellt und ihre Differenz berechnet. Diese Differenz zeigt die Mehrkosten, die bei der Sanierung des MVZ in Folge der innovativen Verglasung entstehen.

Tabelle 2: Mehrkosten der Holzintegralfenster mit Jalousien im Scheibenzwischenraum

Holzintegralfenster mit Jalousien im Scheibenzwischenraum	2.158.673 €
Standardverglasung	- 1.019.557 €
Mehrkosten der Innovation	= 1.139.116 €

Das ursprüngliche Konzept der elektrochromen Verglasung soll aber nicht vollständig fallen gelassen werden. Für eine vergleichende Untersuchung verschiedener Verglasungsvarianten unter realen Bedingungen wird ein kleiner Teil des Gebäudes mit elektrochromer Verglasung ausgerüstet. Räume mit medizinischer Nutzung sind hiervon ausgeschlossen um etwaige Probleme aufgrund der Auswirkungen der getönten Scheiben auf die Lichtfarbe im Innenraum zu vermeiden. Um die Anforderungen des Denkmalschutzes zu erfüllen, werden zudem nur Fenster ausgewählt, die von außen nicht sichtbar sind. Dieses Kriterium wird beispielsweise von den Fenstern zum Innenhof erfüllt. Nach Fertigstellung des Gebäudes ist ein umfassendes Monitoring der Betriebsdaten geplant, u.a. um eine Datenbasis für die Analyse, Bewertung und Optimierung des Gebäudekonzeptes zu schaffen. Das Konzept für den sommerlichen Wärmeschutz ist hierbei von besonderem Interesse. Mit Aufnahme der elektrochromen Verglasung können in dieser Phase 2 verschiedene Fensterlösungen vergleichend untersucht

werden, unter realen Bedingungen. Im Rahmen dieser Untersuchung sollen die Auswirkungen auf den thermischen Komfort, den visuellen Komfort (Blendschutz) und den Kunstlichtbedarf ermittelt werden. Um den Einfluss verschiedener Nutzungsformen zu berücksichtigen, werden mehrere Räume mit elektrochromer Verglasung ausgerüstet, mit einer Fensterfläche von zusammen 133 m². Dies entspricht ca. 5% der kompletten Fensterfläche des Gebäudes. Die Kosten dieser Maßnahme sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die Basis bilden spezifische Kosten von 800 €/m² für elektrochrome Fenster.

Tabelle 3: Mehrkosten der elektrochromen Fenster (Teilfläche von 133 m²)

Elektrochrome Fenster	106.400 €
Standardverglasung	- 46.878 €
Mehrkosten der Innovation	= 59.522 €

Tabelle 4 liefert abschließend eine Zusammenfassung der Kosten der beiden innovativen Fensterlösungen im MVZ. Die Holzintegralfenster mit Jalousien im Scheibenzwischenraum sind für 95% der Fensterfläche vorgesehen, die elektrochromen Fenster für die verbleibenden 5%. Der Einsatz der elektrochromen Verglasung ist aufgrund der Anforderungen von Denkmalschutz und medizinischer Nutzung auf einen kleinen Bereich des Gebäudes begrenzt. Sie wird gleichwohl realisiert um die Grundlage einer vergleichenden Untersuchung der beiden Fensterlösungen unter realen Bedingungen zu schaffen.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Kosten für die beiden innovativen Fensterlösungen

Gesamtkosten	
Holzintegralfenster mit Jalousien im Scheibenzwischenraum	2.158.673 €
Elektrochrome Fenster	+ 106.400 €
Summe	= 2.265.073 €
Mehrkosten der Innovation	
Holzintegralfenster mit Jalousien im Scheibenzwischenraum	1.139.116 €
Elektrochrome Fenster	+ 59.522 €
Summe	= 1.198.638 €

Im Pfaff-Projekt waren für die Verglasung des MVZ bisher Fördermittel in Höhe von 1,2 Millionen € vorgesehen, für elektrochrome Fenster und ein elektrochromes Glasdach, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Bisherige Verteilung der Fördermittel

Elektrochrom verglaste Fenster	714.050 €
Elektrochromes Glasdach	+ 485.950 €
Summe	= 1.200.000 €

Wie in diesem Schreiben dargelegt, kann die elektrochrome Verglasung aber nur in einem kleinen Teil des Gebäudes realisiert werden. Eine wertige Alternative bilden die vorgestellten Holzintegralfenster mit Jalousien im Scheibenzwischenraum. Die für die Verglasung des MVZ vorgesehenen Fördermittel sollen daher künftig für die in Tabelle 2 dargestellten Mehrkosten

dieser Fensterlösung verwendet werden. Die Fördermittel in Höhe von 1,2 Millionen € decken die Mehrkosten dieser Fensterlösung vollständig ab. Die verbleibenden Fördermittel sollen für die in Tabelle 3 dargestellten Mehrkosten einer elektrochromen Verglasung in einzelnen Räumen eingesetzt werden. Die neue Verteilung der Fördermittel für die Verglasung des MVZ zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6: Neue Verteilung der Fördermittel

Holzintegralfenster mit Jalousien im Scheibenzwischenraum	1.139.116 €
Elektrochrome Fenster	+ 59.522 €
Summe	= 1.198.638 €

Innovative Aspekte der alternativen Fensterlösung

Folgende Aspekte stellen beim Einsatz der vorgesehenen Fensterlösung eine Herausforderung dar und rechtfertigen, neben den oben genannten Punkten die Förderung der Fensterlösung im Rahmen des FuE-Projektes EnStadt:Pfaff. Zu berücksichtigen sind im Rahmen des Forschungsprojektes und der möglichen gemeinsamen Entwicklung mit dem Anbieter des Systems:

- Der Sonnenschutz muss automatisiert geregelt werden; eine korrigierende, manuelle Regelung durch den Nutzer muss jedoch gewährleistet werden. Ohne eine grundsätzliche automatisierte Regelung kann kein ausreichender Schutz vor zu hohen sommerlichen Wärmeeinträgen garantiert werden. Eine wichtige Option ist z.B. die Präsenzregistrierung von Mitarbeitern.
- Eine innovative Option für die automatisierte Regelung sind optimierte Algorithmen, die die Multifunktionalität des Fassadensystems berücksichtigen.
- Drei Eigenschaften müssen synchron optimiert werden: Blendschutz, Tageslichtnutzung und Sonnenschutz. Die drei Punkte hängen teilweise gegenläufig von bestimmten Eigenschaften des Verglasungssystems ab, daher ist eine ganzheitliche Betrachtung der multifunktionalen Eigenschaften erforderlich.
 - Der Blendschutz im Gebäudeinneren muss gewährleistet werden. Dies erfordert eine optimierte Kombination der Form und optischen Eigenschaften der Lamellen sowie der einzelnen Scheiben der Verglasung. Insbesondere bei hoch-reflektierenden Lamellen (was aus Sicht des Wärmeschutzes hilfreich ist) ist auf den Blendschutz zu achten.
 - Die Tageslichtnutzung ist zu maximieren. Dies ist durch optimierte Regelungsstrategien sowie durch optimierte Parameter der Lamellen möglich.
 - Zur Vermeidung hoher solarer Gewinne ist auf einen ausreichend niedrigen g-Wert zu achten. Dieser wird ebenso von den optischen Eigenschaften der Lamellen sowie der Scheiben bestimmt.

- Eine umfassende Optimierung der Eigenschaften erfordert eine Charakterisierung von optischen Lamellen- und Verglasungseigenschaften im Labor. Eine Optimierung von Regelalgorithmen erfordert Messungen entweder in einem Testaufbau in einem Tagelichtlabor oder vor Ort im MVZ.
- Auf die Dauerhaftigkeit des Gesamtsystems ist zu achten. In der Vergangenheit gab es wiederholt Zuverlässigkeit- und Lebensdauerprobleme mit Sonnenschutzsystemen im SZR. Insbesondere die Hinweise vom Bundesverband Flachglas sowie vom IFT Rosenheim (ift-Richtlinie) sind hier zu berücksichtigen.