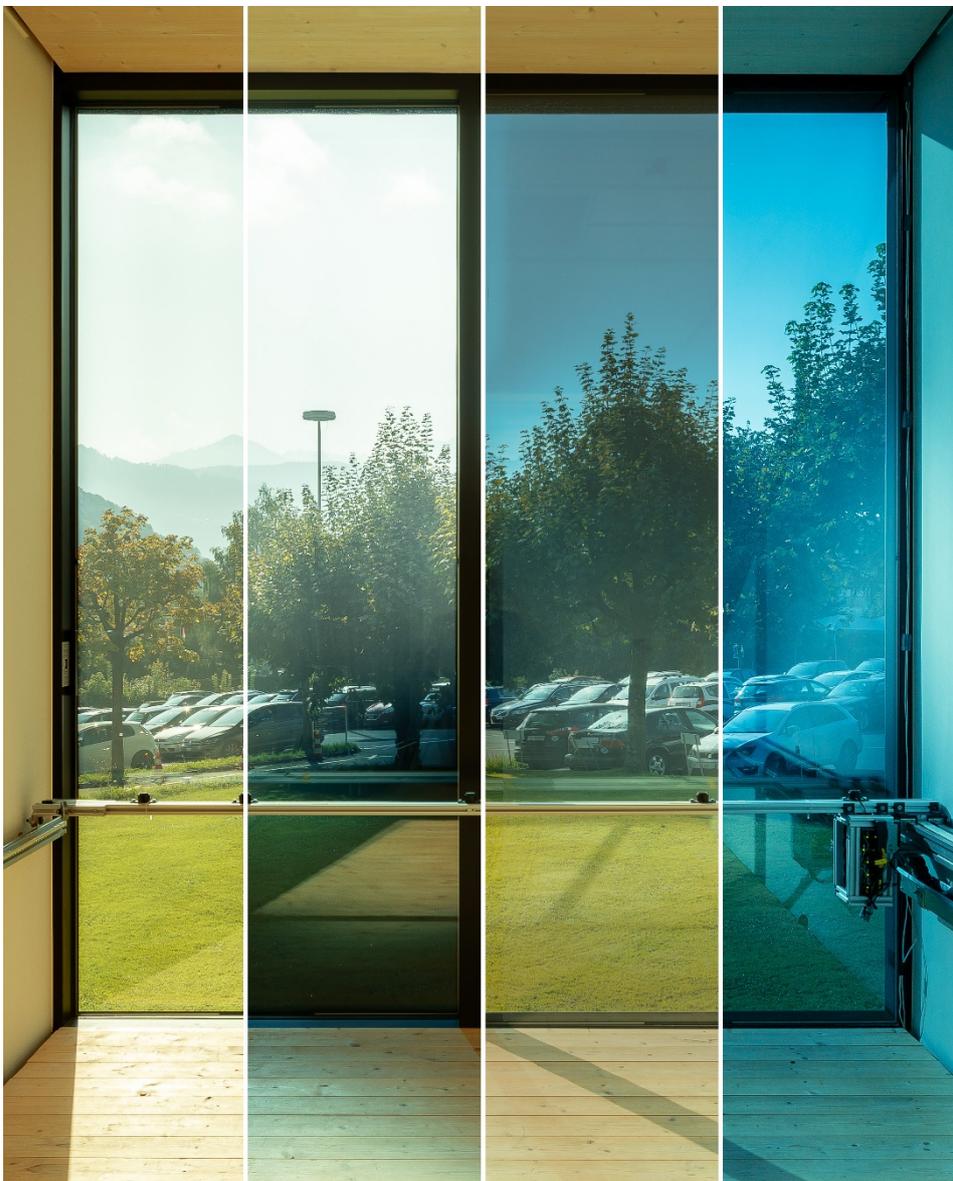




Schlussbericht vom 25. Januar 2021

Elektrochromes Glas

Eine Literaturstudie



Quelle: Licht@hslu



Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

HOCHSCHULE LUZERN

Technik & Architektur
Institut für Gebäudetechnik
und Energie

Datum: 25. Januar 2021

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfängerin:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw
www.hslu.ch

Autor/innen:

Janine Stampfli, Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE, Licht@hslu, janine.stampfli@hslu.ch
Björn Schrader, Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE, Licht@hslu, bjoern.schrader@hslu.ch
Michael Widmer, Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE, michael.widmer@hslu.ch
Susanne Gosztonyi, Institut für Bauingenieurwesen IBI, susanne.gosztonyi@hslu.ch
Thomas Wüest, Institut für Bauingenieurwesen IBI, thomas.wueest@hslu.ch

BFE-Projektbegleitung:

Rolf Moser (Programmleiter), Enerconom AG Bern, moser@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502016-01

An dieser Stelle möchten wir uns bei der Basler & Hofmann AG, SageGlass und der Griesser AG für den aufschlussreichen Austausch und die geteilten Unterlagen bedanken.

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autor/innen dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Elektrochrome Verglasung ist ein System, dessen optische Durchlässigkeit sich durch das Anlegen einer elektrischen Spannung verändert. Die dadurch entstehende Tönung lässt einen Teil der solaren Strahlung nicht mehr ins Rauminnere eintreten. Hersteller von elektrochromem Glas (ECG) vermarkten ihre Produkte als ein Ersatz für eine konventionelle Verglasung mit einem zusätzlichen Sonnenschutz. Als weitere Funktion wird der Blendschutz genannt.

Ob die Verwendung einer elektrochromen Verglasung zu einer Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden führt, ist von vielen Parametern abhängig. Die ausgewerteten Ergebnisse von Studien zeigen ein uneinheitliches Bild. Auch das von der Hochschule Luzern entwickelte Denkmodell ergibt ein gemischtes Resultat: Der Einsatz von ECG kann den Klimakältebedarf reduzieren, nicht aber den Heizwärmebedarf. Der Elektrizitätsbedarf für die Beleuchtung steht in starker Wechselwirkung mit der Steuerungsstrategie des Heizwärme- und Klimakältebedarfs.

Neben dem Energieeinsparpotential gegenüber einem System aus konventioneller Verglasung und einem zusätzlichen Sonnenschutz sollten beim Entscheid für bzw. gegen den Einsatz von ECG weitere Kriterien hinzugezogen werden. Das ECG hat klare Vorteile aufgrund des Fehlens von mechanischen Elementen. So ist die Aussicht in jedem Verdunklungszustand gewährleistet und die Zustandsänderungen erfolgen geräuschlos. Ausserdem ist das ECG verglichen mit einem herkömmlichen Fassadensystem resistenter gegenüber Windlasten und die Reinigungs- und Wartungskosten sind tiefer. Die heute erhältliche elektrochrome Verglasung stellt eine interessante Alternative gegenüber einem System aus konventioneller Verglasung und einem zusätzlichen Sonnenschutz dar. Aus Sicht einer Bauherrschaft ist der Entscheid für die Verwendung von ECG allerdings auch heute noch herausfordernd, da Langzeiterfahrungen mit der neusten Produktgeneration fehlen. Daher empfiehlt es sich, die Weiterentwicklung von ECG für den Gebäudesektor in der Schweiz zu beobachten.



Résumé

Le vitrage électrochrome est un système qui change de transmission optique lorsqu'une tension électrique y est appliquée. La teinte qui en résulte empêche une partie du rayonnement solaire de pénétrer à l'intérieur de la pièce. Les fabricants de verre électrochrome (ECG) commercialisent leurs produits pour remplacer le vitrage standard avec une protection solaire supplémentaire. La protection contre l'éblouissement est également mentionnée comme autre fonction.

Plusieurs facteurs déterminent si l'utilisation de vitrage électrochrome est en mesure d'augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments. Les résultats évalués des études montrent une image incohérente. Le schéma de réflexion développé par l'École d'Ingénieur de Lucerne présente également un résultat mitigé : l'utilisation d'ECG peut réduire le besoin en refroidissement, mais pas le besoin en chauffage. Le besoin d'électricité pour l'éclairage dépend fortement de la stratégie de contrôle du besoin en chauffage et refroidissement.

Outre le potentiel d'économie d'énergie par rapport à un système de vitrage conventionnel avec une protection solaire supplémentaire, d'autres critères doivent être pris en compte pour décider de l'utilisation ou non de l'ECG. L'ECG présente des avantages évidents en raison de l'absence d'éléments mécaniques. La vue est garantie dans chaque stades d'assombrissement et les changements de stade se font en silence. En outre, par rapport à un système de façade conventionnel, l'ECG est plus résistant aux charges de vent et les coûts de nettoyage et d'entretien sont moindres. Le vitrage électrochrome disponible aujourd'hui constitue une alternative intéressante par rapport à un système de vitrage conventionnel avec une protection solaire supplémentaire. Du point de vue du propriétaire d'un bâtiment, la décision d'utiliser l'ECG reste toutefois difficile à prendre aujourd'hui, car l'expérience à long terme avec la dernière génération de produits fait défaut. Il est donc conseillé d'observer le développement futur de l'ECG pour le secteur du bâtiment en Suisse.

Summary

Electrochromic glazing is a system whose optical transmittance changes when an electrical voltage is applied. The resulting tint no longer allows some of the solar radiation to enter the interior of the room. Manufacturers of electrochromic glass (ECG) market their products as a replacement for conventional glazing with additional sun protection. Glare protection is mentioned as a further function.

Whether the use of electrochromic glazing leads to an increase in the energy efficiency of buildings depends on a lot of parameters. The evaluated results of studies show an inconsistent picture. The thought model developed by the Lucerne University of Applied Sciences and Arts also yields mixed results: the use of ECG can reduce the cooling demand, but not the heating demand. The electricity demand for lighting strongly interacts with the control strategy of the heating and cooling demand.

In addition to the energy saving potential compared to a system of conventional glazing with additional sun protection, other criteria should be taken into account when deciding for or against the use of ECG. ECG has clear advantages due to the absence of mechanical elements. The view is guaranteed in every darkening state and the state changes are noiseless. In addition, the ECG is more resistant to wind loads compared to a conventional façade system and the cleaning and maintenance costs are lower. The currently available ECG glazing is an interesting alternative to a system of conventional glazing with additional sun protection. From a building owner's point of view, however, the decision to use ECG is still challenging because long-term experience with the latest generation of products is missing. It is therefore advisable to observe the further development of ECG for the building sector in Switzerland.



Take-home messages

- Aufgrund der durch den Klimawandel häufiger auftretenden Hitzetage wird sich der Fokus der energetischen Optimierung aufs Sommerhalbjahr verschieben. Dadurch wird auch der Einsatz von elektrochromer Verglasung an Bedeutung gewinnen, denn aus energetischer Betrachtung bietet sie während dieser Periode gegenüber einem herkömmlichen Fassadensystem Vorteile.
- Der Einsatz einer elektrochromen Verglasung sollte projektspezifisch (z.B. mittels integraler Simulation) abgeklärt werden, wenn das Ziel die Steigerung der Energieeffizienz ist.
- Standortabhängige Betrachtungen (Klimaregion) sollten fassadenseitig erfolgen (Unterscheidung Nord, Ost, Süd, West).
- Für den Einsatz einer elektrochromen Verglasung sprechen v.a. die uneingeschränkte Aussicht in jedem Verdunklungszustand und die Vermeidung von mechanischen Elementen, welches u.a. Wartungskosten verringert.
- Der Entscheid für bzw. gegen eine elektrochrome Verglasung sollte auf der Basis einer Lebenszyklusanalyse getroffen werden, wenn die Kosten ein Entscheidungskriterium sind.
- Elektrochromes Glas wird laufend weiterentwickelt, wodurch auch dessen energetisches Potential sich vergrößert. Dies sollte beobachtet werden.



Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	8
2	Einleitung	9
2.1	Ausgangslage und Hintergrund	9
2.2	Motivation des Projektes	11
2.3	Projektziele	11
3	Vorgehen und Methode	12
3.1	Work Package 1 – Recherche.....	12
3.1.1	Stand der internationalen Forschung anhand von Veröffentlichungen	12
3.1.2	Stand der Forschung an Schweizer Universitäten und Hochschulen	12
3.1.3	Marktübersicht der Hersteller und deren Produkte.....	12
3.2	Work Package 2 – Analyse	12
3.2.1	Abschätzung des energetischen Potentials	12
3.2.2	Einschätzung des Anwendungspotentials.....	12
4	Ergebnisse und Diskussion	13
4.1	Work Package 1 – Recherche.....	13
4.1.1	Stand der internationalen Forschung anhand von Veröffentlichungen	13
4.1.2	Stand der Forschung an Schweizer Universitäten und Hochschulen	15
4.1.3	Marktübersicht der Hersteller und deren Produkte.....	16
4.2	Work Package 2 – Analyse	21
4.2.1	Abschätzung des energetischen Potentials	21
4.2.1.1	Eigenschaften der verwendeten Systeme.....	22
4.2.1.2	Zusammenhang zwischen Solarstrahlung und g-Wert	23
4.2.1.3	These 1: Durch ECG lässt sich der Klimakältebedarf reduzieren	25
4.2.1.4	These 2: Durch ECG lässt sich der Heizwärmebedarf reduzieren.....	32
4.2.1.5	These 3: Durch ECG lässt sich der Bedarf an künstlicher Beleuchtung reduzieren.....	33
4.2.1.6	Analyse der Heiz- und Kühlperioden	34
4.2.2	Einschätzung des Anwendungspotentials.....	35
4.2.2.1	Vergleich von ECG mit Lamellenstoren	35
4.2.2.2	Erfahrungsaustausch.....	37
4.2.2.3	Kosten und Nutzen von ECG	38
5	Schlussfolgerungen und Fazit	40
6	Literaturverzeichnis	43
7	Anhang	47
7.1	Simulationen der Griesser AG.....	47
7.2	Meteonorm-Einstellungen.....	49



Abkürzungsverzeichnis

DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
ECG	Elektrochromes Glas
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
ρ_e	Reflexionsgrad der solaren Strahlung
ρ_{vis}	Reflexionsgrad des Lichts
T_e	Transmission von solarer Strahlung
T_{vis}	Lichttransmissionsgrad
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient



1 Management Summary

Internationale Studienergebnisse (Abschnitt 4.1.1) deuten darauf hin, dass der Einsatz von elektrochromer Verglasung in warmen Klimaregionen zu Energieeinsparungen führen kann. Vor allem die Ost- und Westfassaden scheinen hierfür vielversprechend. In der nördlichen Hemisphäre scheint die Nordfassade vernachlässigbar und das Potential der Südfassade unklar zu sein. Die Ergebnisse von Schweizer Studien (Abschnitt 4.1.2) sind widersprüchlich.

Elektrochrome Verglasung wird als Sonnenschutz und teilweise auch als Blendschutz vermarktet (Abschnitt 4.1.3). Während die Tönung des ECGs in der warmen Jahreszeit die unerwünschten solaren Lasten vermindert, werden die in der kalten Jahreszeit willkommenen solaren Gewinne reduziert. Im ungetönten Zustand verfügt ECG heute noch über einen tieferen Gesamtenergiedurchlassgrad und einen tieferen Lichttransmissionsgrad als die in dieser Studie betrachteten konventionelle Verglasung.

Das in dieser Studie erarbeitete Denkmodell kommt zum Schluss, dass sich der Klimakältebedarf durch elektrochrome Verglasung reduzieren lässt, nicht aber der Heizwärmebedarf. Der Elektrizitätsbedarf für die Beleuchtung steht in starker Wechselwirkung mit der Steuerungsstrategie des Heizwärme- und Klimakältebedarfs (Abschnitt 4.2.1). Der Umfang möglicher Energieeinsparungen durch den Einsatz von elektrochromer Verglasung hängt von dessen Einsatzfähigkeit und Marktdurchdringung ab. Da in der Schweiz aktuell mehrheitlich Nichtwohngebäude mit Kühlsystemen ausgestattet sind, beschränkt sich das energetische Potential von ECG hauptsächlich auf diesen Teil des nationalen Gebäudeparks. Der Klimawandel und die dadurch häufiger auftretenden Hitzetage könnten dies allerdings ändern.

Ein Alleinstellungsmerkmal einer elektrochromen Verglasung ist die uneingeschränkte Nutzung des Sonnenschutzes auch bei hohen Windlasten. Weiterhin bieten sie Nutzer/innen eine Sichtverbindung nach aussen in jedem Verdunklungszustand. Durch das Fehlen von mechanischen Elementen kann ECG auch eine Option bei der Nachrüstung von denkmalgeschützten Gebäuden sein. Das Anwendungspotential von elektrochromer Verglasung wird allerdings durch die fehlende Erfahrung geschmälert (Abschnitt 4.2.2).



2 Einleitung

2.1 Ausgangslage und Hintergrund

Verglasungsprodukte mit verschiedenen technologischen Ansätzen werden unter den Begriffen «intelligentes Glas» («smart glass») oder «schaltbares Glas» («switchable glass») zusammengefasst. Neben dem elektrochromen Glas (ECG), gibt es beispielsweise auch Photochromes Glas, Thermochromes Glas oder «Micro-Blinds». Neuere Entwicklungen bedienen sich auch der Technologie der Flüssigkristalle. Teilweise dienen diese Ansätze als Sichtschutz, teilweise kommen sie als Sonnenschutz zum Einsatz. In Absprache mit dem Auftraggeber wird in dieser Literaturstudie nur auf das ECG und dessen Verwendung in Fassaden eingegangen.

ECG ist eine Verglasung, dessen optische Durchlässigkeit sich durch das Anlegen einer elektrischen Spannung verändert. Dabei nutzt es die Funktion von elektrochromen Materialien. Bei der Abgabe der elektrischen Ladungen an eine dünne Beschichtung (zum Beispiel Wolframoxid) wird diese optisch aktiv und ändert ihre Durchlässigkeit, wobei sie meist bläulich wirkt. Je nach Grösse der angelegten Spannung wird eine unterschiedlich starke Durchlässigkeit erzeugt, was Einfluss auf den Lichttransmissionsgrad (T_{vis}) und Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) hat. Die Dauer dieses Vorgangs variiert je nach Produkt und hängt auch unter anderem von der Grösse der Glasfläche und der Aussentemperatur ab. Wird die Spannung entfernt, kehrt das Glas in seinen ungetönten Ausgangszustand zurück. Die Steuerung kann manuell oder über ein Gebäudeautomationssystem erfolgen. Der Einbezug von Sensordaten des Gebäudes beabsichtigt einen optimierten Betrieb in Bezug auf z.B. thermischen Komfort oder Energieeffizienz des Gebäudes. Das Glas benötigt nur während des Veränderungsprozesses Strom. Auch im abgedunkelten Zustand ermöglicht ECG eine Aussicht. Die Sichtverbindung nach aussen ist somit stets gewährleistet.

ECG wird seit Mitte der 1990er Jahre in Form von kommerziellen Produkten als Alternative zu einer konventionellen Verglasung mit einem zusätzlichen aussenliegenden sommerlichen Wärmeschutz in Fassaden eingesetzt. Allerdings kam es damals nicht zum Durchbruch. Die damaligen Produkte waren kostenintensiv und wiesen nicht die notwendige Nutzerakzeptanz auf. Doch ECG wurde laufend weiterentwickelt. Seit mehreren Jahren gibt es ECG mit unterschiedlicher Zonierung innerhalb einer Glasscheibe (Abbildung 1). Diese Neuerung hat mehr Flexibilität bei der Steuerung von ECG mit sich gebracht und wurde vermehrt bei Projekten in der Schweiz eingesetzt. Als jüngste Weiterentwicklung wurden im Jahr 2019 die einander abgrenzenden Zonierungen durch stufenlose Tönungsübergänge innerhalb einer Glasfläche ersetzt. So kann neben der Schaltung der gesamten Glasfläche nun auch ein weicher Übergang von oben nach unten oder vice versa eingestellt werden. Eine harte horizontale Abgrenzung wird damit vermieden (Abbildung 2).

Im Mai 2019 wurde dieser neuste ECG-Typ in einem Demonstrationsobjekt auf dem Campus der Hochschule Luzern in Horw eingebaut (Abbildung 3). Die Basismessungen sind noch nicht abgeschlossen. Erste Erkenntnisse werden in diesem Bericht erwähnt, wenn sie für diese Literaturstudie als relevant erachtet werden.



Abbildung 1 – Beispiel eines Dreifacheilung der Glasfläche mit durchsichtiger Brüstung [1, S. 4]



Abbildung 2 – Beispiel zweier Glasscheiben mit entgegengesetzten Verläufen [2, S. 2]



Abbildung 3 – SageGlass Harmony™ Einbau in den LichtMessContainer in Horw [Quelle: Licht@hslu]



2.2 Motivation des Projektes

Aufgrund der aktuell auf dem Markt erhältlichen Verglasungsprodukte, sehen sich private und institutionelle Bauherrschaften und der Bund immer öfters mit der Frage der Praxistauglichkeit von ECG als Ersatz für die Kombination von Dreifachverglasung und aussenliegenden Lamellenstoren konfrontiert. Auch wurde zum Thema ECG schon einiges an Forschung betrieben. Im Rahmen dieses Desktop-Research-Projektes soll eine Literaturstudie den Stand der Forschung, die Produktentwicklung und die Marktsituation zum Thema ECG analysieren. Des Weiteren wird das energetische Potential und das Anwendungspotential von ECG evaluiert.

2.3 Projektziele

Das Projekt hat zum Ziel, kritische Erfolgsfaktoren und mögliche weiterführenden Forschungsfragen zu identifizieren. Um dies zu erreichen wird es in die folgenden zwei Teile unterteilt:

1. Recherche:

- Stand der internationalen Forschung anhand von Veröffentlichungen
- Stand der Forschung an Schweizer Universitäten und Hochschulen
- Marktübersicht der Hersteller und deren Produkte

2. Analyse:

- Schätzung des energetischen Potentials von ECG in der Schweiz
- Einschätzung des Anwendungspotentials durch Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen von ECG und Lamellenstoren und einem Reality Check im Einsatz durch Interviews mit Planungsvertreter/innen und Bauherrschaften



3 Vorgehen und Methode

3.1 Work Package 1 – Recherche

3.1.1 Stand der internationalen Forschung anhand von Veröffentlichungen

Mittels Recherche wird nach Publikationen von abgeschlossenen Forschungsprojekten gesucht, die Aussagen zum energetischen Potential von ECG machen. Hierbei steht die Auswirkung auf den Energiebedarf bei der Beleuchtung, beim Kühlen und beim Heizen im Vordergrund. Viele Studien zum energetischen Potential von ECG sind älter als zehn Jahre. Da sich ECG kontinuierlich weiterentwickelt, haben sich die Autor/innen auf die neusten Publikationen fokussiert.

3.1.2 Stand der Forschung an Schweizer Universitäten und Hochschulen

Mittels Recherche wird nach Publikationen von abgeschlossenen Forschungsprojekten zum Thema ECG gesucht, so dass ersichtlich wird, auf welche Bereiche sich die Schweizer Forschung fokussiert. Auf Forschungsprojekte, die sich mit dem energetischen Potential von ECG auseinandersetzen, wird vertieft eingegangen.

3.1.3 Marktübersicht der Hersteller und deren Produkte

Mittels Recherche werden Informationen zu den Top-5 Herstellern von ECG zusammengetragen. Dabei stehen folgende Fragen im Zentrum: Wer sind die wesentlichsten Akteure? Wie sehen die Produktpaletten aus und welche Evolution hat in den letzten Jahren stattgefunden? Wo haben ECG international eine hohe Verbreitung und einen hohen Marktanteil? Wie ist die Verbreitung von ECG im Schweizer Markt? In Sachen Produktpalette wird betrachtet, wie viele und welche Einstellungen die unterschiedlichen Hersteller verwenden. Hierbei werden die selbst-deklarierten Angaben zu Lichttransmissionsraten, g-Werten und U-Werten der unterschiedlichen Einstellungen gesammelt.

3.2 Work Package 2 – Analyse

3.2.1 Abschätzung des energetischen Potentials

Mittels eines neu erarbeiteten Denkmodells wird das energetische Potential von ECG für dessen Einsatz in Nichtwohngebäude in der Schweiz abgeschätzt. Hierbei wird bewusst auf thermische oder lichttechnische Simulationen verzichtet. Stattdessen wird mit Klimadaten gearbeitet. Eine grundlegende Annahme in diesem Modell ist, dass sowohl ECG als auch Lamellenstoren nur als Sonnenschutz zum Einsatz kommen, nicht aber als Blendschutz oder zur Verdunkelung. Folgende drei Thesen werden dabei untersucht:

- These 1: Durch ECG lässt sich der Klimakältebedarf reduzieren
- These 2: Durch ECG lässt sich der Heizwärmebedarf reduzieren
- These 3: Durch ECG lässt sich der Bedarf an künstlicher Beleuchtung reduzieren

3.2.2 Einschätzung des Anwendungspotentials

Mittels einer Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen von ECG und Lamellenstoren wird das Anwendungspotential von ECG untersucht. Des Weiteren werden Beobachtungen und Erfahrungen von an ECG interessierten Fachleuten und Bauherrschaften gesammelt und analysiert, um der Frage nachzugehen, weshalb sich elektrochrome Verglasung bisher nicht durchsetzen konnte.



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Work Package 1 – Recherche

4.1.1 Stand der internationalen Forschung anhand von Veröffentlichungen

Die Forschung zum Thema «energetisches Potential von ECG» fand mehrheitlich mittels Simulationen in unterschiedlichen Programmen statt (z.B. IDA-ICE, EnergyPlus, Radiance und ESP-r). Die Resultate der Studien sind fallspezifisch und sollten auch so verstanden werden: «In Studie XY wurde unter den getroffenen Annahmen Folgendes festgestellt: ...». Tabelle 1 fasst die Ergebnisse einiger Studien zum Energieeinsparpotential von ECG zusammen. Verallgemeinerungen und Vergleiche sollten mit der gebührenden Vorsicht stattfinden, wenn überhaupt. Grund dafür ist die Vielfalt der in den Studien verwendeten Parameter, wie folgende Beispiele aufzeigen:

- ECG Produkte mit unterschiedlichen Charakteristika, d.h. mit minimalen und maximalen g-Werten und Lichttransmissionsgraden,
- Unterschiedliche Referenzen:
 - Verglasung: Einfachverglasung, Doppelverglasung, Dreifachverglasung, Sonnenschutzglas, etc.,
 - Sommerlicher Wärmeschutz: Unterschiedliche fixe und bewegliche Verschattungssysteme,
- Unterschiedliche Steuerungsparameter und folglich auch Steuerungsstrategien: Solare Globalstrahlung, Lufttemperatur, Raumtemperatur, Lichtniveau im Innenraum, Belegungsprofil, Tages- und Jahreszeit, etc. mit jeweils unterschiedlichen vordefinierten Schwellenwerten, die zu entsprechenden Änderungen im untersuchten ECG Produkt und im Referenzprodukt geführt haben,
- Verschiedene Gebäudetypen: Wohngebäude, Gewerbegebäude, Bürogebäude, etc.,
- Verschiedene Orte: Städte in den USA, in Skandinavien, in Zentraleuropa, im Mittelmeerraum, etc., welche sehr unterschiedliche klimatische Bedingungen aufweisen,
- Unterschiedliche Zielgrößen: Das ECG Energieeinsparpotential vom Klimakältebedarf, vom Heizwärmebedarf, von der Beleuchtung und / oder von Geräten.

In einer der wenigen Studien, welche nicht ausschliesslich simuliert hat, wurde ein nach Westen ausgerichteter Konferenzraum in Washington DC (USA) u.a. einer elektrochromen Verglasung nachgerüstet. [3] Die Benutzer/innen durften die automatische ECG-Steuerung der zonierten Fenster manuell übersteuern. Die so ermittelte Energieeinsparung bei der Beleuchtung an Wochentagen betrug 91% im Vergleich zum «alten» Beleuchtungssystem. Die Autor/innen erklärten jedoch, dass diese Einsparungen grösstenteils auf die belegungsabhängige Steuerung, den niedrigeren Zielwert für die Beleuchtungsstärke und die geringere installierte Beleuchtung zurückzuführen waren. Mittels Simulationen wurde zusätzlich die Gesamteinsparung beim jährlichen Energieverbrauch (39-48%) und die Reduzierung des Spitzenstrombedarfs (22-35%) berechnet. [3]



Tabelle 1 – Auswahl von internationalen Studien über das energetische Potential von ECG

Studie	Ergebnisse
A. Aldawoud (2013) [4]	Elektrochrome Verglasung bietet die beste Leistung bei der Reduzierung solarer Warmegewinne im Vergleich zu anderen getesteten fixen Beschattungsbedingungen in heissem, trockenem Klima. Sie hat ein hohes Potential für eine signifikante Reduzierung der jährlichen Spitzenkühlleistung durch die Kontrolle der solaren Warmegewinne in heissen Klimazonen in den Fensterausrichtungen Osten, Süden oder Westen.
L. L. Fernandes et al. (2013) [5]	Bei nach Süden ausgerichteten Räumen haben elektrochrome Verglasungen das Potential, im Vergleich zu gewöhnlichem Klarglas über das ganze Jahr hinweg Beleuchtungsenergie zu sparen.
P. F. Tavares et al. (2014) [6]	Im mediterranen Klima führt der Einsatz von ECG in der Ost- und v.a. in der Westfassade zu positiven Ergebnissen. Für die Südfassade wurde kein signifikanter Vorteil gefunden. ECG hat Vorteile während der warmen Jahreszeit, doch ist möglicherweise für die kalte Jahreszeit nicht geeignet.
D. Jestico (2015) [7]	ECG war in der Lage, Leistungsvorteile u.a. in den folgenden Bereichen zu bieten: 1) Reduzierung des jährlichen Energieverbrauchs fürs Kühlen und für die Beleuchtung und 2) Reduzierung des Spitzenkühlbedarfs. Zusätzlich wurde festgestellt, dass diese Vorteile in wärmeren Klimazonen verstärkt werden.
P. Tavares et al. (2016) [8]	Die ECG Technologie ist eine effektive Option bei Gebäuden, die hauptsächlich gekühlt werden müssen. Die Wirkung von ECG-Fenstern hängt stark von der Ausrichtung der Fassade ab und ist vor allem bei Ost- und Westfassaden eine sinnvolle Option. Für die Südfassade wurde bei der Verwendung von ECG-Fenstern kein signifikanter Vorteil gefunden.
A. Piccolo et al. (2018) [9]	ECG-Verglasung kann in warmen Klimazonen zu einer erheblichen Verringerung des Kühlenergiebedarfs (und des gesamten Gebäudeenergieverbrauchs) führen. Die Vorteile der Energieeinsparung sind in heizungsdominierten Klimazonen weniger ausgeprägt und können bei niedrigen Werten des Fenster-zu-Wand-Verhältnisses durch den Anstieg des Beleuchtungs- und Heizenergiebedarfs, der zu einem Anstieg des Gesamtenergiebedarfs des Gebäudes führt, zunichte gemacht werden.
R. Tällberg et al. (2019) [10]	Die meisten Energieeinsparungen sind auf einen geringeren Kühlbedarf zurückzuführen, während die Auswirkungen auf den Heizbedarf relativ gering sind.

Anzumerken ist, dass die internationale Forschung sich nicht nur mit den auf dem Markt erhältlichen ECG Produkten auseinandersetzt. Ein Forscherteam in den USA hat eine Weiterentwicklung vom konventionellen ECG untersucht: Es handelt sich dabei um ein ECG, welches im Nahinfrarotbereich schaltet und fürs sichtbare Licht transparent bleibt. Unter den von ihnen getroffenen Annahmen fanden die Autor/innen heraus, dass ein solches Nahinfrarot-ECG (N-ECG) ein erhebliches Potential



hat konventionelle Verglasungen in den kühleren, nördlichen Klimazonen der USA in Bezug auf Heiz- und Kühlenergie zu übertreffen.[11] Das N-ECG ist aber dem konventionellen ECG an Standorten mit hoher Kühllast unterlegen, wie eine zweite Studie herausfand. [12] Die Autor/innen stellten auch klar, dass die grössten nationalen Energieeinsparungen aus der Installation von Tageslichtsteuerungen und der Verbesserung des U-Werts der Fenster des aktuellen US-Gebäudebestands resultieren und das Einsparpotential, welches sich direkt aus dem Einsatz von N-ECG ergibt, weniger bedeutend ist. [12]

Quasi das gleiche Forscherteam hat noch eine zweite Weiterentwicklung untersucht: Beim sogenannten «dual-band electrochromic glazing» (DB-ECG) handelt es sich um ein ECG, welches in der Lage ist, seine optischen Eigenschaften sowohl im sichtbaren als auch im nahen Infrarotbereich unabhängig voneinander zu modulieren. Hier wurde gezeigt, dass dieses DB-ECG in einer Vielzahl von Standorten und Gebäudetypen zu grösseren Energieeinsparungen führt verglichen mit einer konventionellen, unveränderlichen Verglasung, konventionellem ECG und dem vorhin erwähnten Nahinfrarot-ECG. Allerdings wird auch darauf hingewiesen, dass die Einsparungen gering sind, so dass der Erfolg eines kommerziell erhältlichen Fensters mit dieser Technologie stark von anderen Parametern bestimmt werden wird, einschliesslich der Kapitalkosten für die Beschaffung und den Einbau, der Systemwartungskosten und der Lebensdauer. [13]

4.1.2 Stand der Forschung an Schweizer Universitäten und Hochschulen

Die Recherche hat ergeben, dass in den vergangenen Jahren in der Schweiz einiges an Forschung zur Weiterentwicklung von elektrochromer Verglasung mit Blick auf den Einsatz der verwendeten Materialien betrieben wurde. [14–16] Hinzu kamen noch ECG-Forschungsprojekte, welche sich mit dem Tageslicht und der thermischen Behaglichkeit befassten [17, 18] oder sich auf die nicht-visuellen Effekte wie beispielsweise zirkadianen Rhythmus und Wachsamkeit [19] fokussierten. Auch wurde untersucht, wie durch farbige Verglasung übertragenes Tageslicht bei unterschiedlichen Innenraumtemperaturen auf Teilnehmer/innen wirkt. [20, 21] Diese Forschungsrichtung ist für ECG deshalb relevant, da es im getönten Zustand systembedingt einen Blaustich aufweist.

Forschungsprojekte von Schweizer Institutionen, welche sich mit dem energetischen Potential von ECG befassen, sind rar. Eine vom BFE finanzierte Studie, welche zwischen 2009 und 2012 durchgeführt wurde, hat u.a. mittels Simulationen den Energiebedarf für die Beleuchtung und fürs Heizen untersucht. [22] Die Autoren fanden heraus, dass der Energieverbrauch bei der verwendeten konventionellen Verglasung mit textiler Markise vor allem fürs Heizen aber auch für die Beleuchtung tiefer liegt als derjenige bei der verwendeten elektrochromen Verglasung. Dies würde gegen den Einsatz von ECG aus rein energetischen Gründen sprechen. Aber sie stellten auch fest, dass die verwendete elektrochrome Verglasung das ganze Jahr über bessere thermische und visuelle Komfortbedingungen bietet als die verwendete konventionelle Verglasung mit textiler Markise (d.h. die Häufigkeit, dass die Innenraumtemperatur ein als angenehm definierter Bereich verlässt, war geringer) und dies bei einem akzeptablen Energieverbrauch für Raumheizung und elektrische Beleuchtung.

Eine zweite Schweizer Studie, welche im Rahmen des «Swiss Competence Center for Energy Research on Future Energy Efficient Buildings & Districts (SCCER FEEB&D)» durchgeführt wurde, untersuchte anhand von Simulationsmodellen das Energieeinsparpotential von ECG für die Beleuchtung und fürs Kühlen von Bürogebäuden in der Schweiz. [23] Die Autor/innen kommen zum Schluss, dass durch den Einsatz von ECG 11% der für die Beleuchtung und fürs Kühlen verwendeten Elektrizität gespart werden kann. Hierbei sei das Potential bei der Beleuchtung grösser ist dasjenige fürs Kühlen, da nicht alle Gebäude mit einem Kühlsystem ausgestattet sind. Insgesamt folgerten sie,



dass die Anwendung von ECG auf den gesamten Schweizer Bürogebäudebestand wahrscheinlich keine grosse Gesamtwirkung auf nationaler Ebene hat, sondern stattdessen Vorteile in spezifischen Fällen, insbesondere für hohe Gebäude und solche mit hohem Glasanteil, welche mit einem Kühlsystem ausgestattet sind. Des Weiteren erklärten sie, dass das heutige bescheidene Energieeinsparpotential für Kühlung durch den Einsatz von ECG sich wohl in Zukunft wegen des Klimawandel deutlich erhöhen wird. Unter «Einschränkungen» weisen die Autor/innen aber noch darauf hin, dass sie das technische Energieeinsparpotential berechnet haben und das tatsächliche Energieeinsparpotential aufgrund eines nicht flächendeckenden Einsatzes von ECG tiefer liegen würde. Auch erwähnten sie, dass die erzielbaren Einsparungen stark davon abhängig sind, welches System ersetzt wird und welche Regelungsstrategie, sowie deren Optimierungsziel (Energie, Beleuchtung, Komfort, Blendschutz usw.), benutzt wird.

4.1.3 Marktübersicht der Hersteller und deren Produkte

Gemäss einer Marktanalyse sind die Hauptakteure in Sachen ECG aktuell folgende fünf Firmen:

- SageGlass, ein amerikanisches Unternehmen des französischen Industriekonzern Saint Gobain, [24]
- Halio International, ein Joint Venture von dem japanischen Glasherstellungsunternehmen AGC und dem amerikanischen Entwickler und Hersteller der Halio-Technologien (Kinestral Technologies, Inc.), [25, 26]
- View Inc., ein amerikanisches Glasherstellungsunternehmen, [27]
- EControl-Glas GmbH & Co. KG, ein deutsches Glasherstellungsunternehmen, [28]
- ChromoGenics, ein schwedisches Glasherstellungsunternehmen. [29]

Von diesen fünf Firmen ist SageGlass das einzige Unternehmen, das sich auf zwei Kontinenten (Amerika und Europa) im Markt etabliert hat. Halio International und View sind fast ausschliesslich auf den amerikanischen Markt fokussiert, EControl-Glas mehrheitlich auf den deutschsprachigen Raum und ChromoGenics auf die skandinavischen Länder. Auf dem Schweizer Markt sind gemäss Desktop-Recherche nur SageGlass mit mehr als 50 realisierten Projekten und EControl-Glas mit mindestens zwei realisierten Projekten aktiv zu sein. [30, 31] Bei allen fünf Firmen sind Bürogebäude die am häufigsten realisierten Projekte. Als zweite Kategorie werden Bildungs- und Forschungsbauten genannt. Nachfolgend werden die Produkte der Hersteller kurz beschrieben.

SageGlass (Saint Gobain) verfügt über folgende Produkte:

- SageGlass classic
- SageGlass neutral clear
- SageGlass bright silver
- SageGlass grey,
- SageGlass blue
- SageGlass green.

SageGlass bright silver beinhaltet eine stärkere Reflexionsbeschichtung zur Wetterseite, um die Aussenansicht silberner und stärker reflektierend erscheinen zu lassen. Bei den Farbvarianten ist das wetterseitige Glas in der entsprechenden Farbe eingefärbt. Dies mit dem Ziel die Aussenansicht im hellen Zustand anzupassen, was auch eine marginale Veränderung der Innenansicht mit sich bringt, da die entsprechende Farbe des wetterseitigen Glases bei der Durchsicht mit angesehen wird. Alle SageGlass Produkte gibt es in unterschiedlichen Ausführungen, beispielsweise Doppel- und



Dreifachverglasung und unterschiedlichen Grössen und Formen (Rechteck, Dreieck, Trapez, Parallelogramm, Viereck und Fünfeck). [32, 33] Des Weiteren sind die SageGlass Produkte in drei verschiedenen «Optionen» erhältlich, welche in Tabelle 2 erklärt sind.

Tabelle 2 – SageGlass «Produkt-Optionen»

Name	Beschreibung	Grafik
SageGlass® («Monozone»)	Eine Glasscheibe, die ganzflächig stufenweise abgedunkelt werden kann (meistens hell, dunkel und zwei Zwischenstufen) [34]	
SageGlass Lightzone®	Eine Glasscheibe mit zwei oder drei unterschiedlichen Tönungszonen (Abbildung 1 und Abbildung 4) [35]	
SageGlass Harmony™	Eine Glasscheibe, welche zusätzlich zur ganzflächigen stufenweisen Abdunkelung über zwei Spezialeinstellungen verfügt: Stufenlose Tönungsübergänge von oben dunkel nach unten hell oder von oben hell nach unten dunkel (Abbildung 2 und die zwei mittleren Elemente im Titelbild) [2, 36]	



Abbildung 4 – Beispiel eines Dreifachteilungs der Glasfläche [1, S. 6]

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die von SageGlass selbstdeklarierten Werte für den Lichttransmissionsgrad, den Gesamtenergiedurchlassgrad und den Wärmedurchgangskoeffizienten für eine Dreifachverglasung vom Typ «SageGlass Classic».



Tabelle 3 – Technische Angaben für eine Dreifachverglasung vom Typ SageGlass Classic [37]

	Hell	Zwischenstufe 1	Zwischenstufe 2	Dunkel
Lichttransmissionsgrad	54%	16%	5%	1%
g-Wert	0.36	0.09	0.05	0.03
U-Wert*	0.6 W/(m ² K)			

* 90% Krypton

Das dynamische Glas von **Halio International** wird ganzflächig abgedunkelt, wobei es keiner vordefinierten Zwischenstufen bedarf. Stattdessen kommen stufenlose Übergänge zwischen hell und dunkel zum Zug (Abbildung 5). Es werden zwei Produkte angeboten, wobei die Variante «Black» in jedem Zustand eine dunklere Tönung aufweist als die Standardvariante. Beide Produkte sind als Doppel- oder Dreifachverglasung erhältlich. [38] Zusätzlich bietet Halio das Produkt «Halio Match» an. Es handelt sich hierbei um ein konventionelles, unveränderliches Glas, welches auf den ungetönten Zustand vom dynamischen Glas abgestimmt ist. [39]



Abbildung 5 – Unterschiedliche Tönungsstufen vom Halio Produkt [38]

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die von Halio selbstdeklarierten Werte für den Lichttransmissionsgrad, den Gesamtenergiedurchlassgrad und den Wärmedurchgangskoeffizienten für eine Dreifachverglasung.

Tabelle 4 – Technische Angaben für eine Dreifachverglasung* von Halio [38]

	Hell	Dunkel
Lichttransmissionsgrad	60%	2%
g-Wert	0.38	0.03
U-Wert	0.6 W/(m ² K)	

* Smarte Tönvorrichtung zwischen zwei Scheiben Planibel Clearvision 5 mm Tempered – 15 mm 90% Argon – Clearvision 6 mm mit iplus Top 1.1 – 15 mm 90% Argon – Clearvision 6 mm mit iplus Top 1.1

Das Produkt von **View Inc.** wird einfach «Smart Windows» genannt. Es verfügt über vier ganzflächige Grundeinstellungen (Abbildung 6). Es ist als Doppel- oder Dreifachverglasung und in unterschiedlichen geometrischen Formen (Rechteck, Trapez und Dreieck) erhältlich. [40] Zusätzlich bietet View noch «View Protect™» an, ein Cloud-verbundenes, softwarebasiertes Glasbruch-Erkennungssystem für ihre dynamischen Fenster. [41]

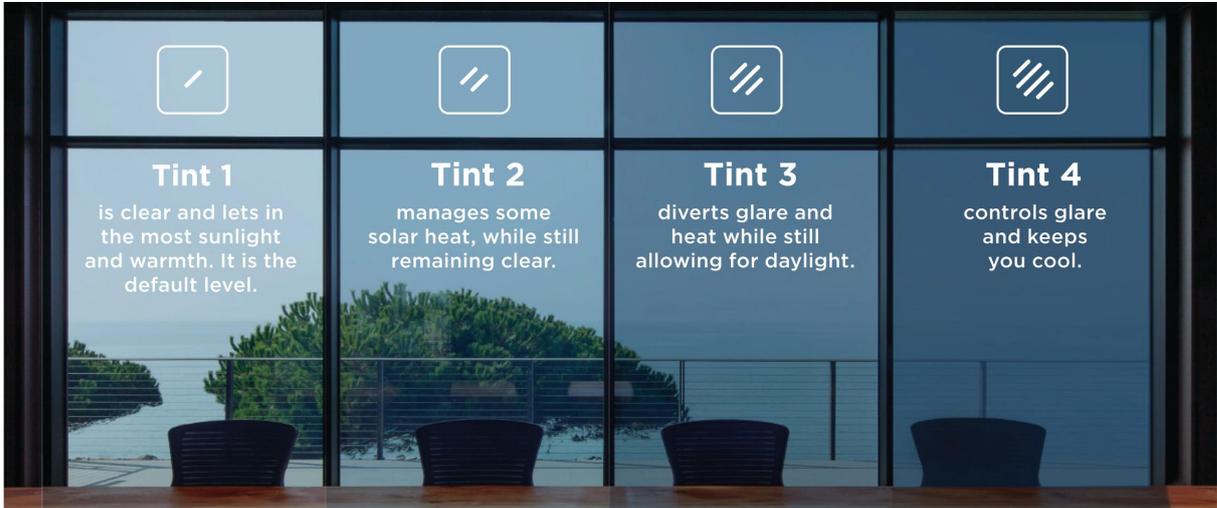


Abbildung 6 – Die vier unterschiedlichen Einstellungen der View Smart Windows [42]

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die von View selbstdeklarierten Werte für den Lichttransmissionsgrad, den Gesamtenergiedurchlassgrad und den Wärmedurchgangskoeffizienten für eine Dreifachverglasung.

Tabelle 5 – Technische Angaben für eine Dreifachverglasung von View* [40]

	Hell	Zwischenstufe 1	Zwischenstufe 2	Dunkel
Lichttransmissionsgrad	47%	27%	5%	1%
g-Wert	0.35	0.22	0.09	0.07
U-Wert	1.2 W/(m ² K)			

* Outboard Lite: 6mm clear FT with EC coating on #2; Inboard Lite: 6mm clear x 2; Cavity: 1/2" (12.7mm); Gas Fill: 90% argon.

Das Glas von **EControl-Glas** wird ganzflächig abgedunkelt, wobei es keiner vordefinierten Zwischenstufen bedarf. Stattdessen kommen stufenlose Übergänge zwischen hell und dunkel zum Zug (Abbildung 7). Hierbei gibt es zwei Produkte im Angebot, eines mit Zweifachverglasung und eines mit Dreifachverglasung: ECONTROL smart glass® II und ECONTROL smart glass® III. [43]

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die von EControl selbstdeklarierten Werte für den Lichttransmissionsgrad, den Gesamtenergiedurchlassgrad und den Wärmedurchgangskoeffizienten für eine Dreifachverglasung.



Abbildung 7 – Die hellste und dunkelste Einstellung vom EControl-Glas Produkt [44]

Tabelle 6 – Technische Angaben für eine Dreifachverglasung von EControl [44]

	Hell	Dunkel
Lichttransmissionsgrad	51%	9%
g-Wert	0.36	0.08
U-Wert*	0.5 W/(m ² K)	

* mit Krypton-Gasfüllung

Das dynamische Glas von **ChromoGenics** nennt sich «ConverLight® Dynamic». Es wird ganzflächig abgedunkelt, wobei es keiner vordefinierten Zwischenstufen bedarf. Stattdessen kommen stufenlose Übergänge zwischen hell und dunkel zum Zug. [45] Es ist als «ConverLight Dynamic 65» und «ConverLight Dynamic 75» erhältlich, wobei ersteres weniger solare Strahlung durchlässt als letzteres. Auch kann zwischen Einfach-, Zweifach-, Dreifach- und Vierfachverglasung gewählt werden. [46] Als weitere dynamische Produkte bietet ChromoGenics ein Fassadenglas (ConverLight® Paragon) und ein vollständig solarbetriebenes dynamisches Fenster (ConverLight® AW) an. [45] Neben dem dynamischen Glas, hat die Firma auch ein konventionelles, unveränderliches Glas (ConverLight® Static) [47] und Sonnenkollektor-Fassadenmodule im Angebot [48].

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die von ChromoGenics selbstdeklarierten Werte für den Lichttransmissionsgrad, den Gesamtenergiedurchlassgrad und den Wärmedurchgangskoeffizienten für eine Dreifachverglasung.



Tabelle 7 – Technische Angaben für eine Dreifachverglasung von ChromoGenics* [46]

	Hell	Dunkel
Lichttransmissionsgrad	61%	33%
g-Wert	0.4	0.21
U-Wert	0.58 W/(m ² K)	

* Dynamic 75 3G

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle Hersteller ihr ECG mindestens als Doppel- oder Dreifachverglasung anbieten. Die Produkte lassen sich in grob in zwei unterschiedliche Gruppen einteilen:

- Die ECG Produkte von SageGlass und View Inc. haben vordefinierte Zwischenstufen, die für eine ganzflächige Tönung des Glases verwendet werden,
- Die Tönung der ECG Produkte von Halio International, E-Control-Glas und ChromoGenics erfolgt über stufenlose Übergänge zwischen hell und dunkel.
- SageGlass ist der einzige Hersteller von ECG mit unterschiedlichen Tönungsstufen innerhalb einer Glasscheibe; dies sowohl mit harten Übergängen (SageGlass Lightzone®) als auch mit weichen (SageGlass Harmony™).

Tabelle 8 fasst die Lichttransmissionsgrade und Gesamtenergiedurchlassgrade von Dreifachverglasungen der oben beschriebenen Hersteller zusammen. Es ist ersichtlich, dass sich die Werte relativ ähnlich sind mit der Ausnahme, dass das Produkt von ChromoGenics im dunkelsten Zustand um einiges mehr Licht und Energie durchlässt als die anderen Produkte.

Tabelle 8 – Übersicht über die maximalen und minimalen Lichttransmissionsgrade und g-Werte und die U-Werte von ECG Produkten (Dreifachverglasungen) unterschiedlicher Hersteller

Hersteller	T _{vis} max.	T _{vis} min.	g-Wert max.	g-Wert min.	U-Wert
SageGlass Classic [37]	54%	1%	0.36	0.03	0.6 W/(m ² K)
Halio [38]	60%	2%	0.38	0.03	0.6 W/(m ² K)
View [40]	47%	1%	0.35	0.07	1.2 W/(m ² K)
EControl [44]	51%	9%	0.36	0.08	0.5 W/(m ² K)
ChromoGenics [46]	61%	33%	0.4	0.21	0.58 W/(m ² K)

4.2 Work Package 2 – Analyse

4.2.1 Abschätzung des energetischen Potentials

Das Denkmodell dieser Studie basiert auf der Verwendung von Klimadaten (Solarstrahlung) an einem Standort in der Schweiz (Horw) und dem Vergleich von g-Werten und Lichttransmissionsgraden während des Tages. Gegenstand der Untersuchung ist ein relatives energetisches Potential bei der Verwendung eines ganzflächig einfärbenden ECGs im Vergleich zu einer Standard-Verglasung mit einem aussenliegenden sommerlichen Wärmeschutz (Lamellenstoren) anhand von drei Thesen. Grundlegende Annahme dabei ist, dass die Storen und die elektrochrome Verglasung anhand von identischen Kriterien automatisch gesteuert werden. Da es sowohl eine Vielzahl von unterschiedlichen Storen und Lamellenstellungen als auch elektrochromer Verglasung und Zwischenstufen gibt, werden



gewisse vereinfachende Annahmen getroffen. Des Weiteren werden interne Wärmegewinne durch z.B. Nutzung und Geräte im nachfolgenden Denkmodell vernachlässigt.

In Abschnitt 4.2.1.1 wird erläutert, welche Kriterien und Parameter für den Vergleich verwendet werden. In Abschnitt 4.2.1.2 wird in Abhängigkeit von Parametern aus den Klimadaten eine Steuerungsstrategie entworfen und diese auf die zwei Systeme übertragen. Die anschliessenden drei Abschnitte (4.2.1.3 bis 4.2.1.5) behandeln folgende drei Thesen:

- These 1: Durch ECG lässt sich der Klimakältebedarf reduzieren
- These 2: Durch ECG lässt sich der Heizwärmebedarf reduzieren
- These 3: Durch ECG lässt sich der Bedarf an künstlicher Beleuchtung reduzieren

Abschliessend folgt eine kurze Analyse der Heiz- und Kühlperioden (Abschnitt 4.2.1.6).

4.2.1.1. Eigenschaften der verwendeten Systeme

Wie in Tabelle 8 ersichtlich ist, können ECG Produkte sehr unterschiedliche Werte aufweisen. Auch konventionelle Dreifachverglasungen und Lamellenstoren können sehr verschieden sein (Tabelle 9). Um klare Aussagen machen zu können, werden im Denkmodell deshalb repräsentative Produkte verwendet (Tabelle 10). SageGlass Classic [37] («Monozone») dient als ECG Produkt, da es einerseits ganzflächig eintönt, womit es stellvertretend für mehrere Hersteller ist, und andererseits über vordefinierte Zwischenstufen verfügt. Gemäss dem Wertevergleich in Tabelle 8 handelt es sich um ein relativ repräsentatives ECG Produkt. Für die konventionelle Dreifachverglasung dient ein Produkt der Firma Glas Trösch und für die Store eines der Firma Griesser AG.

Tabelle 9 – Kenndaten für den Systemvergleich

	T_{vis}	g-Wert	U-Wert	ρ_{vis}
Konventionelle Dreifachverglasung [49]	73-75%	0.62-0.66	0.6-0.9 W/(m ² K)	-
Lamellen	-	-	-	1-85% ¹
ECG Dreifachverglasung (ungetönt) ²	47%-61%	0.35-0.4	0.5-1.2 W/(m ² K)	-

Tabelle 10 – Kenndaten der gewählten Produkte

	T_{vis}	g-Wert	U-Wert	ρ_{vis}
Verglasung: Silverstar E-Line E2-3, Glas Trösch [49]	73%	0.62	0.7 W/(m ² K)	-
Lamellen: Lamisol 90, Griesser AG («VSR 140 – Metallic») [50]	-	-	-	54%
ECG: SageGlass Classic [37] («Monozone») (ungetönt)	54%	0.36	0.6 W/(m ² K)	-

¹ Von RAL9017 (Verkehrsschwarz) bis RAL9003 (Signalweiss)

² Werte gemäss Tabelle 8.



4.2.1.2. Zusammenhang zwischen Solarstrahlung und g-Wert

Der g-Wert gibt an, wie viel Solarstrahlung in das Gebäudeinnere dringt. Im Sommer sollte dieser möglichst gering sein, um das Gebäude vor Überhitzung zu schützen. Im Winter sollte dieser möglichst hoch sein, so dass die solaren Gewinne genutzt werden können. Wie Tabelle 8 aufzeigt, sind die g-Werte für ECG Produkte in Abhängigkeit der Tönungsstufe variabel. Da das Denkmodell für den Vergleich mit der Standard-Verglasung ein ECG mit vordefinierten Zwischenstufen benötigt, werden die von SageGlass spezifizierten vier Stufen verwendet (Tabelle 11).

Tabelle 11 – Tönungsstufen von SageGlass Classic [37] («Monozone»)

Tönungsstufen	g-Wert	T_{vis}
ECG Full Tint	0.03	1%
Zwischenstufe 2	0.05	5%
Zwischenstufe 1	0.09	16%
ECG Full Clear	0.36	54%

Der g-Wert und der Lichttransmissionsgrad ist bei Lamellenstoren auch variabel und hängt massgeblich von folgenden Faktoren ab:

- Lamellengeometrie
- Sonnenstand
- Solare Eigenschaften der Lamellenoberfläche
- Lamellenstellung

Um eine Vergleichbarkeit für den Gesamtenergiedurchlassgrad zu gewährleisten, wird der g-Wert gemäss den Normen EN ISO 52022-1 [51] und EN ISO 52022-3 [52] für bestimmte Lamellen- und Sonnenpositionen berechnet. Die standardisierten Berechnungen vernachlässigen jedoch die Transmission von Solarstrahlung durch «offene» Bereiche, welche massgeblich zum g-Wert beitragen.

Die solare Einstrahlung selbst setzt sich aus einem direkten und einem diffusen Anteil zusammen. Während die direkte Einstrahlung entsprechend dem Sonnenstand eine definierte Richtung besitzt, hat die diffuse Einstrahlung keine definierte Richtung und wird oft als ungefähr horizontal angenommen. Wird z.B. eine Lamellenstore mit «geraden» Lamellen von 75 mm mit einem vertikalen Abstand von 70 mm betrachtet, lassen sich die Sonnenstand- bzw. Lamellenwinkel abhängigen Eigenschaften darstellen. So ist in Abbildung 8 (Berechnungen gemäss [53]) ersichtlich, dass bei horizontaler Lamellenstellung folgendes gilt:

- Die Transmission der Diffusstrahlung ($T_{e \text{ dif tot}}$) beträgt aufgrund der horizontalen Einstrahlung immer 100%,
- Die Transmission der Direktstrahlung ($T_{e \text{ dir tot}}$) nimmt mit steigendem Sonnenstand ab,
- Die Transmission der Direktstrahlung erreicht bei einer Sonnenhöhe von ca. 43° den «cut-off» Winkel, ab welcher nur noch die indirekte solare Transmission der Direktstrahlung stattfindet,
- Die Transmission der Direktstrahlung wird mit zunehmendem Sonnenstand auch zunehmend von den solaren Eigenschaften der Oberfläche ($0\% < \rho_e < 100\%$) beeinflusst.

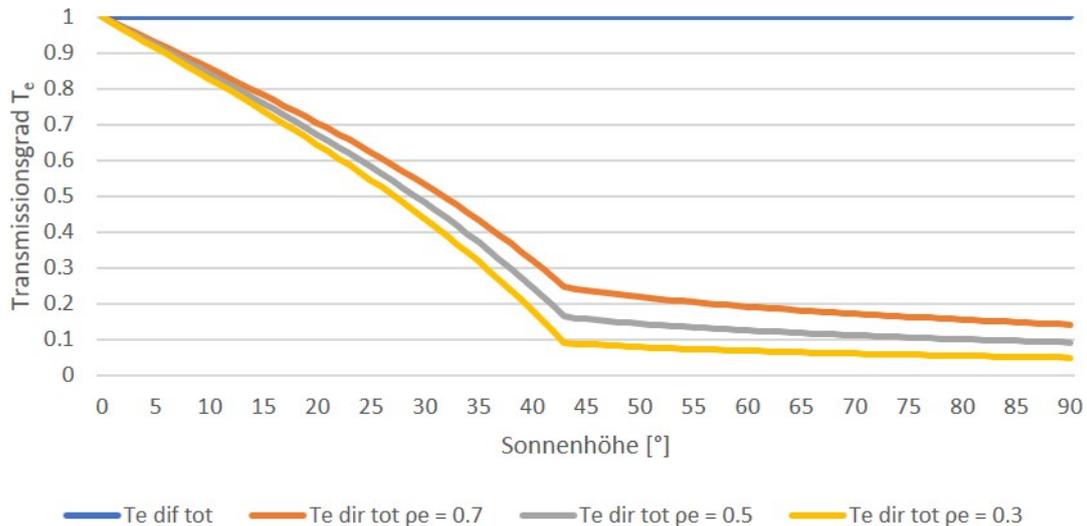


Abbildung 8 – Transmissionsanteile einer Store mit horizontaler Lamellenstellung bei unterschiedlichen Sonnenhöhen (eigene Darstellung; Berechnung gemäss [53])

Zur Vereinfachung wird in dieser Studie mit ein «cut-off» Winkel 45° gearbeitet, d.h. der Sonnenstand wird in die beiden Bereiche «unter oder gleich 45°» und «über 45°» geteilt. Diese Simplifizierung stimmt mit dem vereinfachten Modell in der Norm EN ISO 52022-1 [51] überein. Um ein Vergleich der beiden Systeme durchführen zu können, wird zu jeder ECG Tönungsstufe eine passende und in der Praxis auch umsetzbare Lamellenstellung einer Store zugeordnet (Tabelle 12).

Tabelle 12 – Gegenüberstellung von ECG Einstellungen mit unterschiedlichen Lamellenstellungen einer Store

Tönungsstufen	Lamellenstellungen einer Store
ECG Full Tint	Standard-Verglasung + Store mit 90° Lamellenstellung (geschlossen)
Zwischenstufe 2	Standard-Verglasung + Store mit 45° Lamellenstellung (Arbeitsstellung)
Zwischenstufe 1	Standard-Verglasung + Store mit 0° Lamellenstellung (horizontal)
ECG Full Clear	Standard-Verglasung + keine Store

Die Firma Griesser AG hat die g-Werte und Lichttransmissionsgrade für ein System bestehend aus der in Tabelle 10 spezifizierten Verglasung und Store in unterschiedlichen Lamellenstellungen bei einem Sonneneinstrahlungswinkel von 45° simuliert und zur Verfügung gestellt (Anhang 7.1). Tabelle 13 fasst die g-Werte für die Referenz- und Sommerbedingungen gemäss EN ISO 52022-3 [52] und die simulierten Lichttransmissionsgrade für die unterschiedlichen Lamellenstellungen zusammen.



Tabelle 13 – Simulierte g-Werte für die Referenz- und Sommerbedingungen und Lichttransmissionsgrade

Lamellenstellungen einer Store	g-Wert Referenzbedingungen	g-Wert Sommerbedingungen	T_{vis}
Standard-Verglasung + Store mit 90° Lamellenstellung (geschlossen)	0.013	0.021	0%
Standard-Verglasung + Store mit 45° Lamellenstellung (Arbeitsstellung)	0.088	0.095	8.4%
Standard-Verglasung + Store mit 0° Lamellenstellung (horizontal)	0.142	0.15	14.5%
Standard-Verglasung + keine Store	0.622	0.622	73%

Die Norm EN ISO 52022-3 [52] empfiehlt, dass die Sommerbedingungen u.a. für die Berechnung der Kühllast herangezogen werden. So basiert die Analyse zum Klimakältebedarf (These 1) auf den Sommerbedingungen und die Analyse zum Heizwärmebedarf (These 2) verwendet die Referenzbedingungen.

4.2.1.3. These 1: Durch ECG lässt sich der Klimakältebedarf reduzieren

Tabelle 14 fasst die g-Werte der Simulationen der Firma Griesser AG (Sommerbedingungen) und diejenigen von SageGlass Classic («Monozone») zusammen. Bei einer vereinfachten Betrachtungsweise ist die These, dass durch den Einsatz von ECG der Klimakältebedarf reduziert werden kann, erfüllt, wenn der g-Wert vom ECG kleiner ist als der g-Wert der Standard-Verglasung (teilweise mit Store). Der Vergleich von unterschiedlichen ECG Einstellungen mit unterschiedlichen Lamellenstellungen einer Store in Tabelle 14 zeigt auf, dass das ECG in drei der vier Gegenüberstellungen einen tieferen g-Wert als die Standard-Verglasung (teilweise mit Store)³ aufweist (Tabelle 15). Daraus kann auf einen tieferen Klimakältebedarf geschlossen werden. Im Zustand «dunkel» hat die Verglasung mit geschlossener Store jedoch einen Vorteil.

³ In Tabelle 15, Tabelle 26, Tabelle 28, Tabelle 29 und Tabelle 30 wird anstelle des Ausdrucks «Standard-Verglasung (teilweise mit Store)» nur «Verglasung» verwendet.



Tabelle 14 – Vergleich von g-Werten einer simulierten Standard-Verglasung und Store (Sommerbedingungen) mit SageGlass Classic Datenblattangaben

Zustand	System	g-Wert
Dunkel	Standard-Verglasung + Store mit 90° Lamellenstellung (geschlossen)	0.021*
	<i>SageGlass Classic Full Tint</i>	0.03**
Ziemlich dunkel	Standard-Verglasung + Store mit 45° Lamellenposition (Arbeitsstellung)	0.095*
	<i>SageGlass Classic Zwischenstufe 2</i>	0.05**
Etwas dunkel	Standard-Verglasung + Store mit 0° Lamellenposition (horizontal)	0.15*
	<i>SageGlass Classic Zwischenstufe 1</i>	0.09**
Hell	Standard-Verglasung + keine Store	0.622*
	<i>SageGlass Classic Full Clear</i>	0.36**

* Angaben der Griesser AG (Sommerbedingungen)

** Angaben für eine Dreifachverglasung vom Typ SageGlass Classic [37] («Monozone»)

Tabelle 15 – Ergebnis der Analyse der g-Werte für den Klimakältebedarf

Zustand	g-Wert ECG	g-Wert Verglasung (teilweise mit Store)	Differenz	Vorteil
Dunkel	0.03	0.021	+0.009	Verglasung
Ziemlich dunkel	0.05	0.095	-0.045	ECG
Etwas dunkel	0.09	0.15	-0.06	ECG
Hell	0.36	0.622	-0.262	ECG

In einem zweiten Schritt erfolgt eine Quantifizierung der verschiedenen Zustände anhand von Meteonorm-Daten (Anhang 7.2 für die verwendeten Annahmen). Hierbei steht die Beantwortung der folgenden drei Fragen im Zentrum:

- Wie oft braucht es keinen Sonnenschutz?
- Wie oft sind die Storen geschlossen?
- Wie oft ist die Lamellenstellung einer Store horizontal oder in Arbeitsstellung?

Bevor diese drei Fragen beantwortet werden können, bedarf es einer detaillierten Analyse der Tageslicht-Stunden übers Jahr. Aufgrund der Neigung der Erdachse wird ein Punkt auf der Erde im Verlauf eines Jahres unterschiedlich besonnt. Von diesem Punkt auf der Erde gesehen, ändert sich die Bahn der Sonne jeden Tag. Auf der nördlichen Hemisphäre geht die Sonne im Winter im Südosten auf und im Südwesten unter, im Sommer geht sie jedoch im Nordosten auf und im Nordwesten unter. Auch erreicht die Sonne im Verlauf eines Jahres unterschiedliche Höchststände. Beides kann in einem Sonnenstand-Diagramm (Abbildung 9) visualisiert werden. Für die Schweiz liegt der tiefste Sonnenhöchststand bei ca. 20° am 21. Dezember und der höchste bei ca. 67° am 21. Juni. [54] Der



Hell-Dunkel-Zyklus ändert sich auch entsprechend und wird mit zunehmender Entfernung vom Äquator umso extremer. Lange Winternächte und kurze Sommernächte sind die Folge.

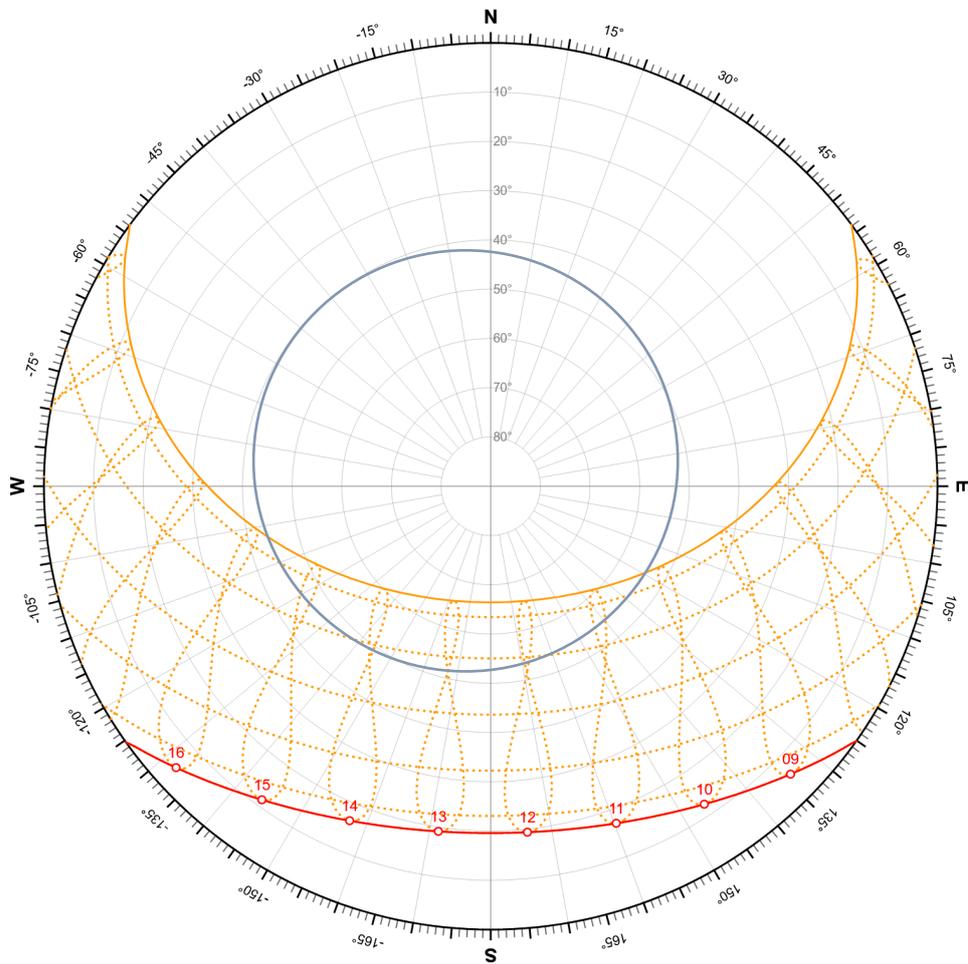


Abbildung 9 – Sonnenstand-Diagramm vom Standort Horw gemäss der Webapplikation «Andrew Marsh – 2D Sun-Path» [55]

In diesem Denkmodell entstehen Tageslicht-Stunden, wenn die Sonne über dem Horizont ist, d.h. wenn der Sonnenstand über 0° ist. Die zweite Spalte in Tabelle 16 zeigt die Anzahl Tageslicht-Stunden für jeden Monat und für das ganze Jahr im Standort Horw (47.013093 Nord, 8.305819 Ost) auf. Mit Hilfe der Farbgebung ist ersichtlich, dass die Wintermonate weniger Tageslicht-Stunden erleben als die Sommermonate. Werden die Anzahl Tageslicht-Stunden in die zwei Sonnenstand-Bereiche «unter oder gleich 45° » und «über 45° » unterteilt, zeigt sich auch, dass die Sonne während fünf Monaten nie über 45° hinauskommt (d.h. Tageslicht-Stunden = 0). Über das gesamte Jahr gesehen erfolgen nur 20% der Tageslicht-Stunden bei einem Sonnenstand von «über 45° », wobei diese zu 99% während den Monaten April bis September anfallen (887 von 893). Von den 80% der Tageslicht-Stunden, welche bei einem Sonnenstand von «unter oder gleich 45° » zustande kommen, fallen knapp die Hälfte auf die Monate April bis September (1'702 von 3'506). In den Monaten April bis September ist somit der Sonnenstand mehr als doppelt so oft «unter oder gleich 45° » als «über 45° » (1'702 im Vergleich mit 887 Tageslicht-Stunden).



Tabelle 16 – Anzahl Tageslicht-Stunden in unterschiedlichen Sonnenstand-Bereichen übers Jahr

	Total	≤ 45°		> 45°	
Januar	279	279	100%	0	0%
Februar	282	282	100%	0	0%
März	363	357	98%	6	2%
April	397	279	70%	118	30%
Mai	464	293	63%	171	37%
Juni	450	240	53%	210	47%
Juli	465	268	58%	197	42%
August	436	288	66%	148	34%
September	377	334	89%	43	11%
Oktober	329	329	100%	0	0%
November	281	281	100%	0	0%
Dezember	279	279	100%	0	0%
Jahr	4'399	3'506	80%	893	20%

Wenn nur die Zeit mit einer Überhitzungsgefahr, d.h. einer solaren Globalstrahlung von $> 200 \text{ W/m}^2$ [56] betrachtet wird, reduziert sich die Anzahl Tageslicht-Stunden, wobei sie je nach Fassadenausrichtung unterschiedlich ausfällt (Tabelle 17). Bei der Südfassade ist eine Überhitzungsgefahr am höchsten, jedoch nur während 1'490 der jährlichen 4'399 Tageslicht-Stunden (34%).⁴ In Tabelle 17 ist auch ersichtlich, dass Überhitzungsgefahr mehrheitlich während den Monaten April bis September auftritt.

Frage 1: Wie oft braucht es keinen Sonnenschutz?

Ein Sonnenschutz wird nicht benötigt, wenn keine Überhitzungsgefahr besteht, d.h. bei einer solaren Globalstrahlung von $\leq 200 \text{ W/m}^2$. [56] Tabelle 18 enthält die Anzahl Tageslicht-Stunden in den Monaten April bis September für acht unterschiedliche Fassadenausrichtungen, während denen kein Sonnenschutz benötigt wird. Da die Monate unterschiedlich viele Tageslicht-Stunden besitzen (Tabelle 16), ist eine prozentuale Betrachtung aussagekräftiger. Dank der Farbgebung ist in Tabelle 19 ersichtlich, dass je nördlicher die Fassadenausrichtung ist desto unwahrscheinlicher der Einsatz eines Sonnenschutzes.

Im analysierten Meteonorm-Datenset wird im April, August und September auf der Nordfassade nie ein sommerlicher Wärmeschutz benötigt. Auch beim höchsten Bedarf an einem sommerlichen Wärmeschutz (d.h. im September auf der Südfassade), kommt er während 59% der Zeit nicht zum Einsatz. Dies bedeutet, dass ein ECG während der meisten Zeit in einem ungetönten Zustand verwendet wird. Aufgrund des tieferen g-Werts im Zustand «hell» ist das ECG einer Standard-Verglasung überlegen, wie Tabelle 15 zeigt.

⁴ Das verwendete Meteonorm-Datenset weist für die Monate Mai, Juni und Juli teilweise unerwartete Werte aus (z.B. auf der Südfassade).



Tabelle 17 – Anzahl Tageslicht-Stunden, während denen ein sommerlicher Wärmeschutz erforderlich ist

	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
Januar	0	0	16	66	78	62	21	0
Februar	0	0	36	86	98	78	39	1
März	0	23	74	126	156	129	88	22
April	0	41	85	128	152	139	98	55
Mai	9	71	106	135	136	127	100	73
Juni	23	84	116	145	131	139	118	83
Juli	18	85	114	148	150	168	147	102
August	1	61	107	143	168	165	121	71
September	0	29	75	113	154	135	94	41
Oktober	0	4	50	87	115	86	39	2
November	0	0	29	69	87	71	30	0
Dezember	0	0	22	52	65	52	16	0
Jahr	51	398	830	1'298	1'490	1'351	911	450

Tabelle 18 – Anzahl Tageslicht-Stunden in den Monaten April bis September, während denen kein sommerlicher Wärmeschutz erforderlich ist

	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
April	397	356	312	269	245	258	299	342
Mai	455	393	358	329	328	337	364	391
Juni	427	366	334	305	319	311	332	367
Juli	447	380	351	317	315	297	318	363
August	435	375	329	293	268	271	315	365
September	377	348	302	264	223	242	283	336

Tabelle 19 – Anteil an Tageslicht-Stunden in Prozent, während dem kein sommerlicher Wärmeschutz erforderlich ist

	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
April	100%	90%	79%	68%	62%	65%	75%	86%
Mai	98%	85%	77%	71%	71%	73%	78%	84%
Juni	95%	81%	74%	68%	71%	69%	74%	82%
Juli	96%	82%	75%	68%	68%	64%	68%	78%
August	100%	86%	75%	67%	61%	62%	72%	84%
September	100%	92%	80%	70%	59%	64%	75%	89%



Frage 2: Wie oft sind die Storen geschlossen?

Die Anzahl Tageslicht-Stunden, während denen eine Store geschlossen ist, folgt aus der gleichzeitigen Anwendung der beiden Bedingungen Überhitzungsgefahr (solaren Globalstrahlung von > 200 W/m²) und Sonnenstand von «unter oder gleich 45°». Unter diesen Bedingungen findet bei einer horizontalen Lamellenstellung der Store eine direkte solare Transmission der Direktstrahlung statt (Abschnitt 4.2.1.2). Eine komplett geschlossene Store verhindert dies.

Tabelle 20 zeigt, wie diese Werte für die Monate April bis September auf den verschiedenen Fassadenausrichtung unterschiedlich ausfallen. Auch hier ist eine prozentuale Betrachtung aussagekräftiger. Dank der Farbgebung ist in Tabelle 21 ersichtlich, dass die Store auf den südlichen Fassadenseiten v.a. während der Monate April, August und September geschlossen ist. Die tiefen Werte für die südlichen Fassadenausrichtungen während der Monate Mai, Juni und Juli deuten darauf hin, dass bei einem Sonnenstand «unter oder gleich 45°» kaum Überhitzungsgefahr besteht.

Im analysierten Meteoronorm-Datenset muss im April, August und September auf der Nordfassade und im Juni auf der Südfassade eine Store nie geschlossen werden. Am häufigsten wird eine Store im September auf der Südfassade geschlossen (während 33% der Tageslicht-Stunden). Übertragen auf ECG bedeutet dies, dass es höchstens während einem Drittel der Tageslicht-Stunden in voll getöntem Zustand im Einsatz ist. Aufgrund des tieferen g-Werts im Zustand «dunkel» ist eine Standard-Verglasung dem ECG überlegen, wie Tabelle 15 zeigt. Allerdings dringt bei einer Standard-Verglasung mit geschlossener Store praktisch kein Tageslicht ins Rauminnere (Tabelle 14) und es gibt keine Sichtverbindung nach aussen.

Tabelle 20 – Anzahl Tageslicht-Stunden in den Monaten April bis September, während denen eine Store geschlossen ist

	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
April	0	41	61	60	73	70	72	55
Mai	9	58	60	56	39	58	66	59
Juni	23	51	56	43	0	43	59	55
Juli	17	58	62	51	11	55	76	70
August	1	60	71	62	66	79	80	70
September	0	29	67	87	126	107	88	41

Tabelle 21 – Anteil an Tageslicht-Stunden in Prozent, während dem eine Store geschlossen ist

	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
April	0%	10%	15%	15%	18%	18%	18%	14%
Mai	2%	13%	13%	12%	8%	13%	14%	13%
Juni	5%	11%	12%	10%	0%	10%	13%	12%
Juli	4%	12%	13%	11%	2%	12%	16%	15%
August	0%	14%	16%	14%	15%	18%	18%	16%
September	0%	8%	18%	23%	33%	28%	23%	11%



Frage 3: Wie oft ist die Lamellenstellung einer Store horizontal oder in Arbeitsstellung?

Die Anzahl Tageslicht-Stunden, während denen die Lamellenstellung einer Store horizontal oder in Arbeitsstellung ist, folgt aus der gleichzeitigen Anwendung der beiden Bedingungen Überhitzungsgefahr (solaren Globalstrahlung von $> 200 \text{ W/m}^2$) und Sonnenstand von «über 45° ». Unter diesen Bedingungen findet bei einer horizontalen Lamellenstellung der Store nur die indirekte solare Transmission der Direktstrahlung statt (Abschnitt 4.2.1.2). Tabelle 22 zeigt, wie diese Werte für die Monate April bis September auf den verschiedenen Fassadenausrichtung unterschiedlich ausfallen. Auch hier ist eine prozentuale Betrachtung aussagekräftiger. Dank der Farbgebung ist in Tabelle 23 ersichtlich, dass die Lamellenstellung einer Store auf den südlichen Fassadenseiten v.a. während der Monate Mai, Juni und Juli horizontal oder in Arbeitsstellung ist.

Im analysierten Meteoronorm-Datenset ist die Lamellenstellung einer Store beispielsweise auf der Nordfassade nie horizontal oder in Arbeitsstellung. Der Höchstwert liegt bei 30% der Tageslicht-Stunden im Juli auf der Südfassade. Dies bedeutet, dass ein ECG höchstens während 30% der Tageslichtstunden in einer Zwischenstufe im Einsatz ist. Aufgrund des tieferen g-Werts in den Zuständen «ziemlich dunkel» und «etwas dunkel» ist das ECG einer Standard-Verglasung überlegen, wie Tabelle 15 zeigt.

Tabelle 22 – Anzahl Tageslicht-Stunden in den Monaten April bis September, während denen die Lamellenstellung einer Store horizontal oder in Arbeitsstellung ist

	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
April	0	0	24	68	79	69	26	0
Mai	0	13	46	79	97	69	34	14
Juni	0	33	60	102	131	96	59	28
Juli	1	27	52	97	139	113	71	32
August	0	1	36	81	102	86	41	1
September	0	0	8	26	28	28	6	0

Tabelle 23 – Anteil an Tageslicht-Stunden in Prozent, während dem die Lamellenstellung einer Store horizontal oder in Arbeitsstellung ist

	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
April	0%	0%	6%	17%	20%	17%	7%	0%
Mai	0%	3%	10%	17%	21%	15%	7%	3%
Juni	0%	7%	13%	23%	29%	21%	13%	6%
Juli	0%	6%	11%	21%	30%	24%	15%	7%
August	0%	0%	8%	19%	23%	20%	9%	0%
September	0%	0%	2%	7%	7%	7%	2%	0%

Tabelle 24 ist eine Zusammenfassung der vorangegangenen Tabellen und zeigt auf, wie oft auf welcher Fassadenseite und in welchem Monat welche ECG Einstellung zum Zug kommt. Wie in Tabelle 15 ersichtlich ist, hat das ECG während den Sommermonaten gegenüber einer Standard-Verglasung in den zwei Zwischenstufen und v.a. in einem ungetönten Zustand energetische Vorteile.



Diese Einstellungen kommen zwischen 66% (Südfassade im September) und 100% der Zeit (z.B. Nordfassade im April, August und September) vor. Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass das ECG während den Sommermonaten energetisches Potential besitzt, d.h. dass durch den Einsatz von ECG der Klimakältebedarf reduzieren kann. **Die These ist somit erfüllt.**

Tabelle 24 – Anteil an Tageslicht-Stunden in Prozent der ECG-Einstellungen⁵

	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
April								
ECG ungetönt	100%	90%	79%	68%	62%	65%	75%	86%
ECG Zwischenstufen	0%	0%	6%	17%	20%	17%	7%	0%
ECG getönt	0%	10%	15%	15%	18%	18%	18%	14%
Mai								
ECG ungetönt	98%	85%	77%	71%	71%	73%	78%	84%
ECG Zwischenstufen	0%	3%	10%	17%	21%	15%	7%	3%
ECG getönt	2%	13%	13%	12%	8%	13%	14%	13%
Juni								
ECG ungetönt	95%	81%	74%	68%	71%	69%	74%	82%
ECG Zwischenstufen	0%	7%	13%	23%	29%	21%	13%	6%
ECG getönt	5%	11%	12%	10%	0%	10%	13%	12%
Juli								
ECG ungetönt	96%	82%	75%	68%	68%	64%	68%	78%
ECG Zwischenstufen	0%	6%	11%	21%	30%	24%	15%	7%
ECG getönt	4%	12%	13%	11%	2%	12%	16%	15%
August								
ECG ungetönt	100%	86%	75%	67%	61%	62%	72%	84%
ECG Zwischenstufen	0%	0%	8%	19%	23%	20%	9%	0%
ECG getönt	0%	14%	16%	14%	15%	18%	18%	16%
September								
ECG ungetönt	100%	92%	80%	70%	59%	64%	75%	89%
ECG Zwischenstufen	0%	0%	2%	7%	7%	7%	2%	0%
ECG getönt	0%	8%	18%	23%	33%	28%	23%	11%

4.2.1.4. These 2: Durch ECG lässt sich der Heizwärmebedarf reduzieren

Tabelle 25 fasst die g-Werte der Simulationen der Firma Griesser AG (Referenzbedingungen) und diejenigen von SageGlass Classic («Monozone») zusammen. Durch die Nutzung von solaren Gewinnen von Oktober bis März kann der Heizwärmebedarf reduziert werden. Damit die These erfüllt ist, dass der Einsatz von ECG zu einer Reduzierung des Heizwärmebedarfs führt, muss der g-Wert vom ECG grösser als der g-Wert der Standard-Verglasung (teilweise mit Storen) sein. Analog zum Vergleich der ECG-Stufen und der Lamellenstellungen der Store für den Klimakältebedarf, ist in Tabelle 26 ersichtlich, bei welcher Einstellung welches Produkt einen höheren g-Wert hat, d.h. bei welchem Produkt der Heizwärmebedarf tiefer ist: Tabelle 26 zeigt, dass das ECG nur in einer der vier Einstellungen überlegen ist: Im Zustand «dunkel». Dieser Zustand empfiehlt sich im Winter jedoch nicht, da so die solaren Gewinne nicht genutzt werden können. **Die These ist somit nicht erfüllt.**

⁵ Aufgrund von Rundungen werden nicht immer 100% erreicht.



Tabelle 25 – Vergleich von g-Werten einer simulierten Standard-Verglasung und Store (Referenzbedingungen) mit SageGlass Classic Datenblattangaben

Zustand	System	g-Wert
Dunkel	Standard-Verglasung + Store mit 90° Lamellenstellung (geschlossen)	0.013*
	<i>SageGlass Classic Full Tint</i>	0.03**
Ziemlich dunkel	Standard-Verglasung + Store mit 45° Lamellenposition (Arbeitsstellung)	0.088*
	<i>SageGlass Classic Zwischenstufe 2</i>	0.05**
Etwas dunkel	Standard-Verglasung + Store mit 0° Lamellenposition (horizontal)	0.142*
	<i>SageGlass Classic Zwischenstufe 1</i>	0.09**
Hell	Standard-Verglasung + keine Store	0.622*
	<i>SageGlass Classic Full Clear</i>	0.36**

* Angaben der Griesser AG (Referenzbedingungen)

** Angaben für eine Dreifachverglasung vom Typ SageGlass Classic [37] («Monozone»)

Tabelle 26 – Ergebnis der Analyse der g-Werte für den Heizwärmebedarf

Zustand	g-Wert ECG	g-Wert Verglasung (teilweise mit Store)	Differenz	Vorteil
Dunkel	0.03	0.013	+0.017	ECG
Ziemlich dunkel	0.05	0.088	-0.038	Verglasung
Etwas dunkel	0.09	0.142	-0.052	Verglasung
Hell	0.36	0.622	-0.262	Verglasung

4.2.1.5. These 3: Durch ECG lässt sich der Bedarf an künstlicher Beleuchtung reduzieren

Eine künstliche Beleuchtung kommt dann zum Einsatz, wenn ein Innenraum nicht mit genügend Tageslicht versorgt wird. Zur Untersuchung der These, ob sich durch den Einsatz von ECG der Bedarf an künstlicher Beleuchtung reduzieren lässt, werden die Lichttransmissionsgrade der ECG-Stufen mit denjenigen der unterschiedlichen Lamellenstellungen der Store verglichen. Tabelle 27 zeigt auf, bei welcher Einstellung welches Produkt einen höheren Lichttransmissionsgrad hat, d.h. bei welchem Produkt der Bedarf an künstlicher Beleuchtung tiefer ist. Tabelle 28 fasst dies zusammen und zeigt, dass das ECG und die Standard-Verglasung in je zwei Zuständen gegenüber dem anderen einen Vorteil aufweist. Der Unterschied beim Zustand «hell» ist beträchtlich. In diesem Zustand hat eine Standard-Verglasung einen geringeren Energiebedarf an künstlicher Beleuchtung. **Die These konnte somit nicht bestätigt werden.**



Tabelle 27 – Vergleich von Lichttransmissionsgraden einer simulierten Standard-Verglasung und Store mit SageGlass Classic
Datenblattangaben

Zustand	System	T _{vis}
Dunkel	Standard-Verglasung + Store mit 90° Lamellenstellung (geschlossen)	0%*
	<i>SageGlass Classic Full Tint</i>	1%**
Ziemlich dunkel	Standard-Verglasung + Store mit 45° Lamellenposition (Arbeitsstellung)	8.4%*
	<i>SageGlass Classic Zwischenstufe 2</i>	5%**
Etwas dunkel	Standard-Verglasung + Store mit 0° Lamellenposition (horizontal)	14.5%*
	<i>SageGlass Classic Zwischenstufe 1</i>	16%**
Hell	Standard-Verglasung + keine Store	73%*
	<i>SageGlass Classic Full Clear</i>	54%**

* Angaben der Griesser AG

** Angaben für eine Dreifachverglasung vom Typ SageGlass Classic [37] («Monozone»)

Tabelle 28 – Ergebnis der Analyse der Lichttransmissionsgrade für den Bedarf an künstlicher Beleuchtung

Zustand	T _{vis} ECG	T _{vis} Verglasung (teilweise mit Store)	Differenz	Vorteil
Dunkel	1%	0%	+1%	ECG
Ziemlich dunkel	5%	8.4%	-3.4%	Verglasung
Etwas dunkel	16%	14.5%	+1.5%	ECG
Hell	54%	73%	-19%	Verglasung

4.2.1.6. Analyse der Heiz- und Kühlperioden

Der Klimakältebedarf, der Heizwärmebedarf und der Bedarf an künstlicher Beleuchtung können auch kombiniert betrachtet werden: Im Sommer ist aus energetischer Sicht ein möglichst tiefer g-Wert und ein möglichst hoher Lichttransmissionsgrad erwünscht; im Winter ist es von Vorteil, wenn beide Werte hoch sind. Die nachfolgenden Tabellen fassen diese beiden Betrachtungen zusammen. Tabelle 29 zeigt auf, dass in den Sommermonaten, während denen eine Überhitzungsgefahr vermieden werden soll, weder ECG noch die Standard-Verglasung klar dominieren. Aus thermischer Sicht hat das ECG Vorteile, doch geht dies mit einem leicht erhöhten Bedarf an Energie für die künstliche Beleuchtung einher. Tabelle 30 ist das Pendant zu Tabelle 29 für den Winter. Aus thermischer Sicht hat die Verglasung einen Vorteil, welcher teilweise durch den tieferen Bedarf an künstlicher Beleuchtung bestärkt wird.



Tabelle 29 – Ergebnis der Analyse der g-Werte und Lichttransmissionsgrade für den Sommer

Zustand	Tieferer g-Wert	Höherer T_{vis}	Vorteil
Dunkel	Verglasung	ECG	<i>projektspezifisch</i>
Ziemlich dunkel	ECG	Verglasung	<i>projektspezifisch</i>
Etwas dunkel	ECG	ECG	<i>ECG</i>
Hell	ECG	Verglasung	<i>projektspezifisch</i>

Tabelle 30 – Ergebnis der Analyse der g-Werte und Lichttransmissionsgrade für den Winter

Zustand	Höherer g-Wert	Höherer T_{vis}	Vorteil
Dunkel	ECG	ECG	<i>ECG</i>
Ziemlich dunkel	Verglasung	Verglasung	<i>Verglasung</i>
Etwas dunkel	Verglasung	ECG	<i>projektspezifisch</i>
Hell	Verglasung	Verglasung	<i>Verglasung</i>

4.2.2 Einschätzung des Anwendungspotentials

Die Einschätzung des Anwendungspotentials von ECG basiert auf drei Ansätzen:

- Ein Vergleich von ECG mit Lamellenstoren, indem deren jeweilige Vor- und Nachteile beschrieben werden
- Erfahrungsaustausch mit Experten aus der Baubranche, welche Interesse an und/oder Erfahrung mit ECG haben
- Kosten und Nutzen von ECG

4.2.2.1. Vergleich von ECG mit Lamellenstoren

ECG und Lamellenstoren haben einige Gemeinsamkeiten. Die Hauptfunktion von beiden ist der sommerliche Wärmeschutz, d.h. Sonnenschutz zur Vermeidung von Überhitzung, denn beide Systeme lassen im «aktivierten» Zustand die solare Strahlung nur noch reduziert ins Rauminnere. Beide Systeme werden zusätzlich als Blendschutz vermarktet und verwendet. Lamellenstoren können theoretisch als Blendschutz verwendet werden, doch empfiehlt sich dies aus zwei Gründen nicht: Erstens können in den Wintermonaten die solaren Gewinne nicht genutzt werden. Zweitens schliessen Lamellenstoren meistens von oben nach unten, was unvorteilhaft für die Tageslichtversorgung im Raum ist. Deshalb wird der Gebrauch eines zusätzlichen innenliegenden Blendschutzes, der von unten nach oben gefahren werden kann, empfohlen. Auch das getönte ECG soll bei einem tiefen Sonnenstand die Nutzer/innen in vordefinierten Arbeitsbereichen vor Blendung schützen. Nur können so die solaren Gewinne in der kalten Jahreszeit nicht voll zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs genutzt werden, womit auch in diesem Fall ein innenliegender Blendschutz, der von unten nach oben gefahren werden kann, von Vorteil ist.

Eine weitere Gemeinsamkeit ist, dass bei ECG und Lamellenstoren die Steuerung automatisch und / oder manuell erfolgen kann. Unabhängig von den Bedingungen draussen werden Lamellenstoren oft auch zur Verdunklung eines Raumes benutzt, um beispielsweise eine Lichtprojektion klarer darstellen zu können. Wie befriedigend ein ECG einen Raum abdunkeln kann, kommt auf dessen Lichtdurchlässigkeit in getöntem Zustand an (« T_{vis} min.» in Tabelle 8).



ECG und Lamellenstoren weisen auch einige Unterschiede auf. So sind Lamellenstoren ein altbekanntes, viel verwendetes Produkt. Es gibt eine grosse Anzahl an verschiedenen Systemen, welche sehr unterschiedliche Eigenschaften, Funktionalitäten und auch Preise aufweisen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in der Mehrheit der Projekte nur einfache Standardausführungen verwendet werden, da die bei einem Neubau oder einer Sanierung involvierten Gewerke Erfahrung damit haben. ECG hingegen ist eine relativ neue Technologie mit einer limitierten Anzahl Fachexpert/innen. Installation und Inbetriebnahme sind einer speziell geschulten Personengruppe vorbehalten. Bauherrschaften sehen sich hierbei aktuell noch in der Logistik und zeitlichen Abstimmung und Verfügbarkeit mit mehr Unsicherheit konfrontiert.

Das Fehlen von mechanischen Elementen verschafft dem ECG klare Vorteile in verschiedenen Bereichen. So ist der sommerliche Wärmeschutz stets gewährleistet – auch bei hohen Windlasten. Dies spricht für dessen Einsatz in hohen Gebäuden, denn Lamellenstoren müssen ab einer gewissen Windlast aus Gründen des Produktschutzes hochgefahren werden. Auch kann ECG in Projekten verwendet werden, für welche ein aussenliegender Sonnenschutz keine Option ist, z.B. bei der Nachrüstung von denkmalgeschützten Gebäuden. [8] Des Weiteren erfolgt eine Zustandsänderung bei ECG geräuschlos während bei einer Lamellenstore eine Veränderung akustisch wahrnehmbar ist.

Ein weiterer Vorteil von ECG gegenüber Lamellenstoren ist die ungehinderte Aussicht, denn auch bei der dunkelsten Einstellung bleibt die Sichtverbindung nach aussen gewährleistet. Bei einem hohen Sonnenstand werden Lamellenstoren zur Vermeidung von Überhitzung nach Möglichkeit horizontal gestellt. Dies bedeutet, dass die Aussicht noch möglich, jedoch visuell beeinträchtigt ist. Bei Überhitzungsgefahr werden Lamellenstoren meist ganz geschlossen, womit die Aussicht nicht mehr gewährleistet ist, ausser sie verfügen über perforierte Lamellen. [57, S. 11]

Als erstes von vier Kriterien, die zur Sicherstellung einer angemessenen Aussicht erfüllt werden sollen, führt die im Juni 2019 in Kraft getretene Schweizer Norm «SN EN 17037 – Tageslicht in Gebäuden» folgendes auf: «Das Verglasungsmaterial der Sichtöffnung sollte eine Aussicht bieten, die als klar, unverzerrt und neutral gefärbt wahrgenommen wird» [58, S. 13]. ECG weist bei einer Verdunklung einen Blaustich auf. [59] Mit Blick auf die Farbwahrnehmung in einem Raum ist es von Vorteil, wenn nicht das gesamte Glas eingefärbt wird, da so das Tageslicht, welches durch die ungetönte Verglasung eintritt, der Farbverschiebung entgegenwirken kann. [60, 61] Auch die Forschung sieht eine «neutralere» Farbgebung im getönten Zustand als eine empfohlene Verbesserung von ECG. [62] Alternativ kann eine künstliche Beleuchtung die Farbverschiebung reduzieren.

Bei den handelsüblichen grauen Lamellenstoren ist die Aussicht «neutral gefärbt» und im Innenraum kommt es zu keiner oder nur einer kleinen Farbverschiebung aufgrund des von den Lamellen reflektieren Tageslichts. [59] Bei farbigen Lamellen können Einfärbungen des Lichts auftreten. Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), nach deren System auch Bauprojekte in der Schweiz (in leicht angepasster Form) zertifiziert werden können, macht Vorgaben zur Farbwiedergabe von Tageslicht. Indikator 6 des Kriteriums «Visueller Komfort» gibt als Methode an: «Es ist der Farbwiedergabeindex Ra der Kombination aus Verglasung und Sonnen-/ Blendschutz in allen tagesbelichteten ständig genutzten Bereichen zu bestimmen» [63, S. 13].



4.2.2.2. Erfahrungsaustausch

Ein Nutzer, der in einem mit ECG verglasten Gebäude arbeitet

Am 18. Februar 2020 fand ein Erfahrungsaustausch mit einer Fachperson aus dem Bereich der Gebäudetechnik der Firma Basler & Hofmann AG statt, welche in einem mit ECG⁶ verbauten Gebäude arbeitet. Aus der Nutzerperspektive wurden folgende zentralen Aussagen festgehalten:

- Umschaltprozess ist kaum wahrnehmbar; nur bei stark wechselhaftem Himmel wird er als störend empfunden
- Manuelle Steuerung wird genutzt
- Das ECG scheint Wärme abzublocken (gefühlte, keine Messung)
- Eine Vernetzung der Steuerung der künstlichen Beleuchtung mit dem ECG wäre vorteilhaft

Eine Bauherrschaft, die sich bei einer Sanierung für ECG entschieden hat

Am 2. Juli 2020 fand ein Zoom-Interview mit einem Vertreter der Bauherrschaft der Firma Basler & Hofmann AG statt, die ganzflächig einfärbendes ECG bei der Sanierung eines Gebäudes verwendet hatte (Fertigstellung 2019). Nachfolgend sind die wichtigsten Punkte festgehalten:

Motivation und Entscheidungskriterien für ECG:

Ziel war es, dass das Gebäude durch die Sanierung zu einem Leuchtturmprojekt wird, d.h. es sollte über innovative Elemente verfügen. Zu diesem Konzept habe ECG sehr gut gepasst. Dafür habe man auch die geschätzt doppelt so hohen Investitionskosten in Kauf genommen, welche langfristig u.a. durch geringere Unterhalts-, Reinigungs-, Ersatzkosten gutgemacht werden sollten. Des Weiteren handle es sich beim Gebäude um ein kleines Hochhaus. Aussenliegende Sonnenschutzsysteme sind bei einem solchen Gebäudetyp aufgrund von beispielsweise Windlasten und erhöhtem Wartungsaufwand kritisch. Im Winter wolle man aber die Wärmeeinträge nützen. Vor dem Entscheid für ECG fanden Besuche von bestehenden ECG-Projekten statt. Auch wurde das Produkt von den firmeninternen Ingenieuren umfassend evaluiert (z.B. betriebstechnische, bauphysikalische, und bautechnische Aspekte). Trotz dieser Vorarbeiten und dem Kauf der Produkte von einem etablierten Grossunternehmen empfand man den Entscheid als ein gewisses Wagnis.

Montage und Umsetzung:

Bei der Montage gab es einen technischen Zusatzaufwand, z.B. aufgrund der Kabelverlegung. Die Inbetriebnahme verlief nicht nach Plan. Es dauerte sechs Monate bis das System mit all seinen Funktionen zuverlässig lief. Grund für diese lange Dauer war, dass beim Hersteller zu der Zeit ein Mangel an geschultem Personal herrschte. Zusatzkosten seien dadurch aber keine entstanden. Obwohl eine gewisse Abhängigkeit vom Hersteller besteht (z.B. bei allfälligen Änderungen der programmierten Einstellungen), verfügen sie weder über einen Wartungs- noch über einen Service-Vertrag.

Nutzerakzeptanz und Betrieb:

Die ECG-Verglasung wurde von den Angestellten sehr gut akzeptiert. Richtig eingestellt vermag das ECG sowohl einen aussenliegenden Sonnenschutz wie auch einen innenliegenden Blendschutz zu ersetzen. Der ungehinderte Sichtbezug nach aussen werde als positiv bewertet. Die ganzflächige Einfärbung des Glases sei unproblematisch, denn das Grossraumbüro verfügt über mehr als eine verglaste Fassadenseite, so dass sich das durch ein getöntes ECG eintretende Tageslicht im Raum mit «neutralem» Tageslicht vermische, da die Fassaden einzeln gesteuert werden. Es habe sich herausgestellt, dass die «langen» Umschaltzeiten (ca. 7 Minuten), welche bei der Evaluierung vor

⁶ SageGlass® («Monozone»)



dem Projekt als negativ bewertet wurden, von den Mitarbeitenden als angenehm empfunden werden, denn das Auge habe so Zeit sich anzupassen.

Fazit:

Da die Erwartungen bisher erfüllt wurden, würden sich die Bauherrschaft wieder für ein solches Produkt entscheiden.

Eine Fachkraft, die trotz starkem Interesse noch kein Projekt mit ECG realisiert hat

Am 6. August 2020 fand ein telefonischer Austausch mit einer an elektrochromer Verglasung interessierten Fachkraft eines Schweizer Immobilienunternehmens statt. Im Rahmen von mehreren Projekten hat sich diese Person mit den Vor- und Nachteilen einer Fassade mit elektrochromer Verglasung gegenüber einer konventionellen Fassade auseinandergesetzt. Die Gesamtbeurteilung im Rahmen eines Projekts fiel für eine einschalige Fassade mit aussenliegendem Sonnenschutz besser aus als für eine Fassade mit elektrochromer Verglasung. Gründe, warum man sich in dem Projekt gegen eine elektrochrome Verglasung entschieden hat, waren u.a. dass das ECG nicht in der gewünschten Grösse verfügbar war, die lange Lieferzeit und das hohe Risiko aufgrund der fehlenden Erfahrung und der Garantiezeit von «nur» zehn Jahren. In Unterlagen, die der Hochschule Luzern vorliegen, werden die Mehrkosten für eine Investition in ein Fassadensystem mit ECG gegenüber einem konventionellen Fassadensystem auf zwischen 22% und 40% geschätzt. In einer Lebenszykluskostenanalyse schnitt jedoch die elektrochrome Verglasung ca. 5% tiefer ab. Allerdings kommt es gemäss dieser Fachkraft bei einer Schätzung der Reinigungskosten stark auf die Annahme der Reinigungsfrequenz an: Je höher diese ist, desto besser schneidet die elektrochrome Verglasung ab.

4.2.2.3. Kosten und Nutzen von ECG

Kostenvergleiche von ECG sind ähnlich divers wie die Studien zu dessen energetischen Potential. Je nachdem womit die Investitionskosten von ECG verglichen werden, schneiden sie besser oder weniger gut ab. Eine Studie fand, dass die Kosten für ein ECG von SageGlass zwar höher sind als für das entsprechende Sonnenschutzglas, die Kosten eines typischen Fassadensystems mit Doppelverglasungen jedoch 10-15% höher liegen als das SageGlass-System und mit Dreifachverglasungen 4%, wenn externe Beschattung und Blendschutz einbezogen werden. [7] Die gleiche Studie weist auch darauf hin, dass die Investitionskosten für Kühlsysteme bei ECG-Projekten aufgrund von geringeren Anforderungen tiefer liegen. [7, 64] In dieser Studie überwog jedoch die Meinung, dass die Investitionskosten für ECG höher liegen als diejenigen für ein vergleichbares konventionelles Fassadensystem. Eine gewisse Einigkeit scheint es allerdings zu den Betriebskosten von ECG zu geben. Aufgrund der fehlenden mechanischen Elemente sind Reinigung und Wartung von ECG einfacher zu bewerkstelligen als von einer konventionellen Verglasung mit sommerlichem Wärmeschutz.

Für Bauherrschaften könnte sich der Einsatz von ECG lohnen, weil ein Gebäude mit ansprechender und moderner Ästhetik einen höheren Marktwert hat und folglich höhere Mieteinnahmen bzw. einen höheren Verkaufspreis erzielen kann, wie beispielsweise SageGlass erklärt. [64] Zusätzlich weist eine Studie darauf hin, dass durch das Fehlen von externen Beschattungssystemen mehr Nettomietfläche zur Verfügung steht, was sich auf die finanzielle Rendite eines Entwicklers auswirkt. [7] Falls in Zukunft Einigkeit darüber besteht, dass der Einsatz von ECG das Wohlbefinden, die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit der Menschen in einem Gebäude erhöht, sollte auch dieser Aspekt einen monetären Wert erhalten und auf der Nutzenseite einer Lebenszyklusbetrachtung einfließen.



Wie die oben erwähnten Überlegungen zu den Kosten und dem Nutzen aufzeigen, bedarf ein Entscheid für oder gegen ECG einer projektspezifischen Lebenszykluskostenanalyse. Allerdings sollte diese für unterschiedliche Zeithorizonte vorgenommen werden, denn aktuell herrscht noch Uneinigkeit, wie lange die Lebensdauer von ECG ist. Hersteller sprechen von einer Lebensdauer von 30 Jahren. [65] Ob sich dies bewahrheitet, wird sich in den kommenden Jahren zeigen.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

Das Einsparpotential durch die Verwendung von ECG ist kontrovers. Diverse Untersuchungen und das in dieser Studie erarbeitete Denkmodell deuten darauf hin, dass es in der warmen Jahreszeit zu einer Reduzierung des Energiebedarfs im Vergleich zu einer konventionellen Verglasung mit einem zusätzlichen Sonnenschutz kommen könnte. Der Klimakältebedarf und somit die Nachfrage nach Kühlsystemen wird in der Schweiz aufgrund der durch den Klimawandel vermehrt auftretenden Hitzetage zunehmen. Folglich würde sich auch das energetische Einsparpotential von ECG vergrössern. Es ist darauf hinzuweisen, dass das energetische Potential von ECG durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst wird: Bauliche Entscheide wie beispielsweise die Fassadenausrichtungen und Grössen der Fassadenöffnungen spielen genauso eine Rolle wie die Wahl des Fassadensystems, womit das ECG verglichen wird, und der Steuerungsstrategie. Die Autor/innen dieser Studie empfehlen deswegen eine projektspezifische Analyse des energetischen Potentials von ECG.

Neben einer möglichen Reduzierung des Energiebedarfs durch den Einsatz von ECG gibt es weitere Argumente, welche für dessen Verwendung sprechen. Ein Alleinstellungsmerkmal ist das Fehlen von mechanischen Elementen, wie sie bei aussenliegenden Sonnenschutzsystemen vorkommen. ECG-Lösungen sind daher gegenüber Windlasen unkritisch im Gegensatz zu herkömmlichen Fassadensystemen. Auch ist ECG eine Option, um denkmalgeschützte Gebäude mit einem sommerlichen Wärmeschutz auszustatten, ohne dass die Ästhetik strukturell oder konstruktiv stark beeinflusst wird. Das Fehlen von mechanischen Elementen verbessert auch die visuelle Qualität, da die Aussicht, welches eines der vier Kriterien der Schweizer Norm SN EN 17037 – Tageslicht in Gebäuden [58] ist, bei jedem Verdunklungszustand von ECG gewährleistet ist. Das durch die getönte Verglasung eintretende Tageslicht widerfährt zwar eine Farbverschiebung, doch dieser kann entgegengewirkt werden, indem sichergestellt wird, dass ein Raum stets auch mit Tageslicht, welches durch eine ungetönte Verglasung eintritt, versorgt wird. Dies kann in Form der neuartigen ECG Produkte mit Zonierung oder Verlauf innerhalb einer Glasscheibe sein (z.B. SageGlass Lightzone® oder SageGlass Harmony™) oder auch indem ECG Produkte in verschiedenen Zonen (einschliesslich auf verschiedenen Fassadenseiten) unterschiedlich gesteuert werden und so eine Durchmischung des Tageslichts im Raum stattfindet. Zusätzlich kann durch eine entsprechend konzipierte künstliche Beleuchtung die Färbung des Tageslichts im Raum weiter reduziert werden.

Eine energetische Optimierung steht oft in einem Zielkonflikt mit einer guten Tageslichtversorgung der Räume. Falls der Stellenwert des Tageslichts auf der Basis der neuen Schweizer Norm SN EN 17037:2019 [58] zunimmt, wird sich dieser Zielkonflikt noch weiter verschärfen. Dies umso mehr, da der Klimawandel und die somit häufiger auftretenden Hitzetage den aktuellen Fokus auf den Heizwärmebedarf in Richtung Klimakältebedarf verschieben. Um die unerwünschten solaren Lasten im Sommer tief zu halten, werden Ansätze benötigt, welche die Tageslichtversorgung nicht ganzjährig beeinträchtigen. [66] Im Winter sind die Bedürfnisse übereinstimmend: Der g-Wert und der Lichttransmissionsgrad sollen möglichst hoch sein. Allerdings kann es aufgrund einer tief stehenden Sonne zu Blendung kommen. Ein innenliegender Blendschutz ist für diesen Fall die einzig richtige Lösung. Im Gegensatz zu einem geschlossenen aussenliegenden Sonnenschutz oder einem getönten ECG, können die solaren Gewinne im Winter mit einem innenliegenden Blendschutz zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs genutzt werden. Ausserdem wird die Tageslichtversorgung in der Regel auch weniger gehindert, v.a. wenn es sich um ein von unten nach oben schliessender Blendschutz handelt. Da ein innenliegender Blendschutz somit sowohl für den Heizwärmebedarf als auch für den Bedarf an



künstlicher Beleuchtung vorteilhaft ist, ist eine konsequente Trennung von sommerlichem Wärmeschutz und Blendschutz erforderlich.

Herkömmliche Systeme von sommerlichem Wärmeschutz verfügen über sehr unterschiedliche Eigenschaften, Funktionalitäten und auch Preise. Die grosse Auswahl stellt Architekten und Fachplaner vor eine Herausforderung und wird teilweise von den Akteuren unterschätzt. Weiter ist davon auszugehen, dass in der Mehrheit der Projekte einfache Standardausführungen verwendet werden, wobei den Autor/innen keine Erhebung zum Schweizer Sonnenschutz-Markt bekannt ist. Auch konventionelle, unveränderliche Verglasungen sind divers. So weist beispielsweise ein Wärmeschutzglas ganz andere Eigenschaften auf als ein Sonnenschutzglas. Ausserdem unterliegen auch diese Produkte einer stetigen Weiterentwicklung. Den Überblick zu behalten ist für Planer und Architekten herausfordernd und bedarf einer ständigen Weiterbildung. Gleich verhält es sich, wenn der Einsatz von einem «schaltbaren Glas» geprüft werden soll, denn elektrochrome Verglasung ist nur eine Lösung von mehreren – alle mit unterschiedlichen Eigenschaften.

ECG ist heute noch mit mehr Unsicherheit bezüglich beispielsweise der Lebensdauer behaftet als eine herkömmliche Lösung. Deswegen empfehlen die Autor/innen dieser Studie eine projektspezifische Bedürfnisanalyse und eine projektspezifische Abklärung der Kosten einer ECG-Lösung im Sinne einer Lebenszyklusanalyse. Wie die projektspezifische Analyse des energetischen Potentials sollte diese auf konkreten, von der Bauherrschaft definierten Annahmen basieren. Die positiven Effekte auf die Nutzer/innen von beispielsweise einer guten Tageslichtversorgung oder einer guten Sichtverbindung zum Aussenraum sollten dabei auch berücksichtigt werden.

Gebäude werden für Menschen gebaut. Deshalb sollten die Bedürfnisse der Nutzer/innen nicht vernachlässigt werden. Eine Steuerung, die auf die Minimierung des Energieverbrauchs ausgelegt ist, ist unwahrscheinlich im Sinne der Nutzer/innen. Jede Übersteuerung einer automatischen Regelung deutet darauf hin, dass sie von den Nutzer/innen als nicht optimal betrachtet wird. Hierbei ist anzumerken, dass sich Nutzer/innen nicht immer rational verhalten. So kann es beispielsweise vorkommen, dass eine Besonnung als so wertvoll empfunden wird, dass dafür eine gewisse Blendung im Kauf genommen wird. Energetische Simulationen klammern den Faktor Mensch aus. Die Wahrnehmung des Nutzers lässt sich nicht einem Datenblatt entnehmen, wie das Beispiel der «langen» ECG-Umschaltzeiten zeigt, welche als positiv empfunden werden.

Weiterführende Forschungsfragen wurden von den Autor/innen in verschiedenen Bereichen aufgedeckt. Das in dieser Studie entwickelte Denkmodell zum energetischen Potential von ECG sollte ausgebaut werden. So könnten alternative Annahmen wie beispielsweise eine Reduzierung der Tageslicht-Stunden auf Bürobetriebszeiten, unterschiedliche Schwellwerte für die Steuerung von ECG und von konventionellem sommerlichem Wärmeschutz und verschiedene Klimawandelszenarien getestet werden. Weiter wäre eine klare Differenzierung zwischen horizontaler Lamellenstellung und Arbeitsstellung einer Store und somit auch den entsprechenden ECG Zwischenstufen ein Mehrwert.

Ausserdem sehen die Autor/innen auch spannende Bereiche bezüglich Anwendungspotential, die sich für zukünftige Studien anbieten: Für Bauherrschaften könnten Empfehlungen für projektspezifische Analysen des energetischen Potentials von ECG und der Lebenszykluskosten von ECG-Fassadensystemen und konventionellen Fassadensystems formuliert werden. Auch könnte eine Entscheidungshilfe bei der Auswahl von Sonnenschutzprodukten basierend auf den Ergebnissen einer Erhebung zum Schweizer Sonnenschutz-Markt erarbeitet werden. Ein Forscherteam aus unterschiedlichen Disziplinen (z.B. Gebäudehülle, Gebäudeautomation und Licht) könnte ein zukünftiges Bauprojekt mit ECG vollumfänglich begleiten, um das Gelernte in Empfehlungen für Bauherrschaften umzuwandeln. Des Weiteren wären Nutzerbefragungen zu deren Erfahrungen



bezüglich z.B. der ECG Steuerung und zu deren Wahrnehmungen ein weiteres aufschlussreiches Forschungsfeld. Da das Wissen über die in dieser Studie behandelte Thematik bei den Akteuren in der Praxis noch zu gering ist, ist ein Weiterbildungsangebot anzudenken.



6 Literaturverzeichnis

- [1] SageGlass, „SageGlass Product Guide“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sageglass.com/de/produkte/sageglass-lightzone>
- [2] SageGlass, „SageGlass Harmony™ - Produktflyer“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sageglass.com/de/produkte/sageglass-harmony>
- [3] E. S. Lee, E. S. Claybaugh und M. LaFrance, „End user impacts of automated electrochromic windows in a pilot retrofit application“, *Energy and Buildings*, Jg. 47, S. 267–284, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.003.
- [4] A. Aldawoud, „Conventional fixed shading devices in comparison to an electrochromic glazing system in hot, dry climate“, *Energy and Buildings*, Jg. 59, S. 104–110, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.031.
- [5] L. L. Fernandes, E. S. Lee und G. Ward, „Lighting energy savings potential of split-pane electrochromic windows controlled for daylighting with visual comfort“, *Energy and Buildings*, Jg. 61, S. 8–20, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.10.057.
- [6] P. F. Tavares, A. R. Gaspar, A. G. Martins und F. Frontini, „Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in Mediterranean climates“, *Energy Policy*, Jg. 67, S. 68–81, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.038.
- [7] D. Jestico, „327: Performance assessment of sageglass electronically tintable glazing“ in *14th International Conference on Sustainable Energy Technologies, 25-27 August 2015*, S. 256–265.
- [8] P. Tavares, H. Bernardo, A. Gaspar und A. Martins, „Control criteria of electrochromic glasses for energy savings in mediterranean buildings refurbishment“, *Solar Energy*, Jg. 134, S. 236–250, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.04.022.
- [9] A. Piccolo, C. Marino, A. Nucara und M. Pietrafesa, „Energy performance of an electrochromic switchable glazing: Experimental and computational assessments“, *Energy and Buildings*, Jg. 165, S. 390–398, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.12.049.
- [10] R. Tällberg, B. P. Jelle, R. Loonen, T. Gao und M. Hamdy, „Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Jg. 200, S. 109828, 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.02.041.
- [11] N. DeForest *et al.*, „Regional performance targets for transparent near-infrared switching electrochromic window glazings“, *Building and Environment*, Jg. 61, S. 160–168, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.12.004.
- [12] N. DeForest *et al.*, „United States energy and CO2 savings potential from deployment of near-infrared electrochromic window glazings“, *Building and Environment*, Jg. 89, S. 107–117, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.02.021.
- [13] N. DeForest, A. Shehabi, S. Selkowitz und D. J. Milliron, „A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings“, *Applied Energy*, Jg. 192, S. 95–109, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.007.
- [14] O. Bouvard, M. A. Gonzalez Lazo, A. Krammer und A. Schüller, „In Situ Photoelectron Spectroscopy: a powerful Tool to Develop Electrochromic Materials“ in *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale*, S. 33–38. [Online]. Verfügbar unter: <https://infoscience.epfl.ch/record/213281>
- [15] D. Mansour, O. Bouvard und A. Schüller, „Development and characterization of electrochromic oxide and ion conductor deposited by reactive magnetron sputtering“, *Energy Procedia*, Jg. 122, S. 787–792, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.397.



- [16] Bouvard und Olivia Valérie Charlotte, „Coatings with tailored electronic and optical properties for advanced glazing: Thèse N° 9199“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://infoscience.epfl.ch/record/262898>
- [17] B. Paule, E. Sok, S. Pantet und J. Boutiller, „Electrochromic glazings: dynamic simulation of both daylight and thermal performance“, *Energy Procedia*, Jg. 122, S. 199–204, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.345.
- [18] J. Page, J.-L. Scartezzini, J. Kaempf und N. Morel, „On-site performance of electrochromic glazings coupled to an anidolic daylighting system“, *Solar Energy*, Jg. 81, Nr. 9, S. 1166–1179, 2007, doi: 10.1016/j.solener.2007.01.011.
- [19] F. S. Webler und V. Soto Magan, „EPFL Smart Glass Field Study“ in *Chronobiology - Society for Light Treatment and Biological Rhythms*, S. 37, doi: 10.1159/000489584.
- [20] G. Chinazzo, K. Chamilothoni, J. Wienold und M. Andersen, „Temperature-Color Interaction: Subjective Indoor Environmental Perception and Physiological Responses in Virtual Reality“ (eng), *Human Factors and Ergonomics Society*, 18720819892383, 2020, doi: 10.1177/0018720819892383.
- [21] G. Chinazzo, J. Wienold und M. Andersen, „Effect of Indoor Temperature and Glazing with Saturated Color on Visual Perception of Daylight“, *LEUKOS*, S. 1–22, 2020, doi: 10.1080/15502724.2020.1726182.
- [22] N. Zarkadis und N. Morel, „Automatic control of an electrochromic window: Final report“, 31. Okt. 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=62216&Load=true>.
- [23] J. Chambers *et al.*, „Evaluating the electricity saving potential of electrochromic glazing for cooling and lighting at the scale of the Swiss non-residential national building stock using a Monte Carlo model“, *Energy*, Jg. 185, S. 136–147, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.07.037.
- [24] SageGlass, *Hauptseite von SageGlass*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sageglass.com/de>.
- [25] Halio Glas, *Halio Glas*. [Online]. Verfügbar unter: <https://halio-glass.eu/>.
- [26] Kinestral Technologies, Inc. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kinestral.com/>.
- [27] View, *View*. [Online]. Verfügbar unter: <https://view.com/>.
- [28] Econtrol-Glas, *Econtrol-Glas*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.econtrol-glas.de/>.
- [29] „ChromoGenics“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chromogenics.com/>
- [30] SageGlass Schweiz. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.saint-gobain.ch/de/marken/sageglass>.
- [31] Econtrol-Glas, *EControl-Glas - Referenzen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.econtrol-glas.de/referenzen/objektgalerie/>.
- [32] SageGlass, „Planungsrichtlinien: Isolierglas-Design“. [Online]. Verfügbar unter: https://sageglass.com/sites/default/files/scs-120_sageglass_igu_cutsheet_de_a4.pdf.
- [33] SageGlass, *SageGlass - Datenblätter*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sageglass.com/de/dokumente?category=198>.
- [34] SageGlass, *SageGlass®*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sageglass.com/de/produkte/sageglass>.
- [35] SageGlass, *SageGlass Lightzone®*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sageglass.com/de/produkte/sageglass-lightzone>.
- [36] SageGlass, *SageGlass Harmony™*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sageglass.com/de/produkte/sageglass-harmony>.
- [37] SageGlass, „SageGlass Climatop Datenblatt“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sageglass.com/sites/default/files/sageglass_datasheet_climatop_42.1ec-12-4-12-4_classic_de_0.pdf



- [38] Halio Glas, „Halio Glas Broschüre“. [Online]. Verfügbar unter: <https://halioglass.eu/de/ressources/>.
- [39] Halio Glas, „Halio Match -Datenblatt“. [Online]. Verfügbar unter: <https://halioglass.eu/de/ressources/>.
- [40] View, „View Gen 4 Insulating Glass Unit (IGU): Data Sheet“. [Online]. Verfügbar unter: https://view.com/sites/default/files/documents/View%20Gen%204%20Datasheet_0717_2.pdf
- [41] View, *View Protect™*. [Online]. Verfügbar unter: <https://view.com/product/smart-buildings/protect>.
- [42] View, „Produkt Overview“. [Online]. Verfügbar unter: <https://view.com/product>
- [43] Econtrol-Glas, „EControl-Glas“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.econtrol-glas.de/>
- [44] „EControl Prospekt“. [Online]. Verfügbar unter: <http://my.page2flip.de/980458/12738337/12738589/html5.html#/6>.
- [45] ChromoGenics, „ChromoGenics - ConverLight® Dynamic“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chromogenics.com/facade-glass/dynamic-glass/>
- [46] ChromoGenics, „ChromoGenics Dynamic Glass, Technical Specification“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chromogenics.com/content/uploads/2019/11/chromogenics-dynamic-glass-technical-specification-eng-ver20191119.pdf>
- [47] ChromoGenics, *ChromoGenics - ConverLight® Static*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chromogenics.com/static-glass/>.
- [48] ChromoGenics, *ChromoGenics - ConverLight® Energy*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chromogenics.com/solar-cell-facade-glass/>.
- [49] Glas Trösch, „SILVERSTAR E-Linie: Das 3-fach-Isolierglas für effiziente Wärmedämmung“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.glastroesch.ch/uploads/tx_lwgtbrochures/bro_silverstar_e-linie_de.pdf
- [50] Griesser AG, „Lamellenstoren von Griesser: Lamisol® III“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.griesser.ch/de/produkte/lamellenstoren/verbundraffstore/lamisol>
- [51] *Energieeffizienz von Gebäuden - Wärmetechnische, solare und tageslichtbezogene Eigenschaften von Bauteilen und Bauelementen - Teil 1: Vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Ermittlung der solaren und tageslichtbezogenen Eigenschaften von Sonnenschutz in Kombination mit Verglasungen (ISO 52022-1:2017)*, EN ISO 52022-1:2017, SIA, Apr. 2018.
- [52] *Energieeffizienz von Gebäuden - Wärmetechnische, solare und tageslichtbezogene Eigenschaften von Bauteilen und Bauelementen - Teil 3: Detailliertes Berechnungsverfahren zur Ermittlung der solaren und tageslichtbezogenen Eigenschaften von Sonnenschutz in Kombination mit Verglasungen (ISO 52022-3:2017)*, EN ISO 52022-3:2017, SIA, Apr. 2018.
- [53] P. Pfrommer, „Thermal Modelling of Highly Glazed Spaces: Ph.D.“, 1995.
- [54] B. Schrader, J. Stampfli, C. Cajochen und O. Stefani, „MINERGIE - WISSEN - Tageslicht: Höchste Lichtqualität im Minergie-Gebäude“, 2019.
- [55] *AndrewMarsh – 2D Sun-Path*. [Online]. Verfügbar unter: <http://andrewmarsh.com/software/sunpath2d-web/>.
- [56] *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*, SIA 180:2014, SIA, Jul. 2014.
- [57] B. Schrader, S. Gerber und U.-P. Menti, „S.A.D.L.E.S.S.: Systemische Betrachtung von Beschattungssystemen mit dem Fokus Tageslicht zur Optimierung der sia – Norm 380/4“. Schlussbericht, 28. Aug. 2015.
- [58] *SN EN 17037 – Tageslicht in Gebäuden*, SN EN 17037:2019, Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), Apr. 2019.
- [59] J. Stampfli, B. Schrader und M. Widmer, „Elektrochromes Glas – Basismessungen“. (in Bearbeitung), 2021.



- [60] John Mardaljevic, „How to Maintain Neutral Daylight Illumination with SageGlass® Electrochromic Glazing“, *SAGE Electrochromics Inc.*, 2014.
- [61] J. Mardaljevic, R. Kelly Waskett und B. Painter, „Electrochromic Glazing: Avoiding the Blues: CIBSE ASHRAE Technical Symposium, Dublin, Ireland, 3-4 April 2014“, 2014.
- [62] A. Piccolo und F. Simone, „Performance requirements for electrochromic smart window“, *Journal of Building Engineering*, Jg. 3, S. 94–103, 2015, doi: 10.1016/j.job.2015.07.002.
- [63] DGNB GmbH, „Soziokulturelle und funktionale Qualität - Visueller-Komfort (SOC1.4): DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/neubau/kriterien/04_SOC1.4_Visueller-Komfort.pdf.
- [64] SageGlass, „Steigern Sie den Wert Ihrer Immobilie mit SageGlass®“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.krapfag.ch/fileadmin/krapf/4-Blog/2018/20180103-Cubic-Campus-Buehler-Group/45080_SageGlass_Investor_A4_DE.pdf.
- [65] SageGlass, *FAQs*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sageglass.com/de/faqs>.
- [66] S. Büttner, J. Stampfli, S. Domingo-Irigoyen, G. Settembrini und B. Schrader, „Bereit für den Klimawandel?: Handlungsempfehlungen für Bauherrschaften und Planende“. (in Bearbeitung), 2021.
- [67] *Meteonorm 7.3*. [Online]. Verfügbar unter: <https://meteonorm.com/>.
- [68] *Meteonorm*, „Handbook part II: Theory“. Version 7.3, 2018.



7 Anhang

7.1 Simulationen der Griesser AG

Bemerkung: Systembedingt wird in der Berechnung das gewählte Dreifachglas mittels eines Zweifachglases mit gleichen Werten simuliert.

Wärmedämm-Verglasung:

- g-Wert=0.62
- $T_{vis} = 73\%$
- U-Wert = 0.7
- ➔ Entspricht wertemässig dem Produkt «Silverstar E-Line E2-3» [49]

Lamelle:

- VSR 140 - Metallic
- Reflexionsgrad der solaren Strahlung = 0.55
- Reflexionsgrad des Lichts = 0.54%
- ➔ Entspricht wertemässig dem Produkt «Limasol» [50]

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Simulationen der Griesser AG.

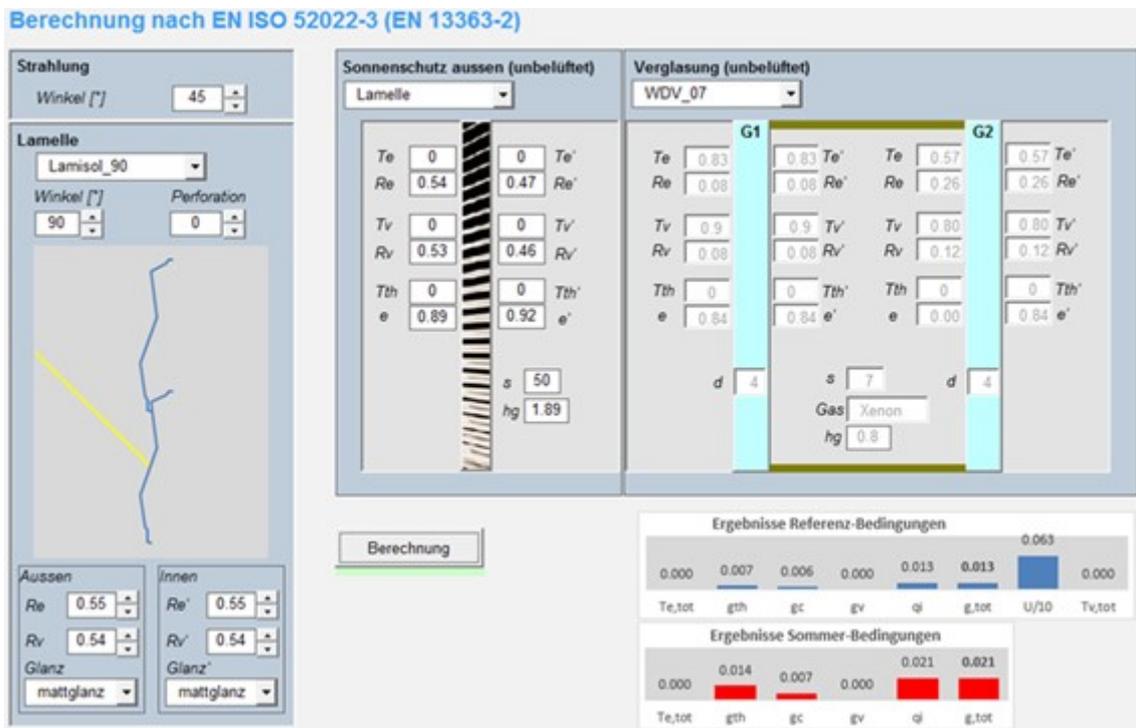


Abbildung 10 – Ergebnisse der Simulation mit geschlossener Store (Lamellen in 90° Stellung)



Berechnung nach EN ISO 52022-3 (EN 13363-2)

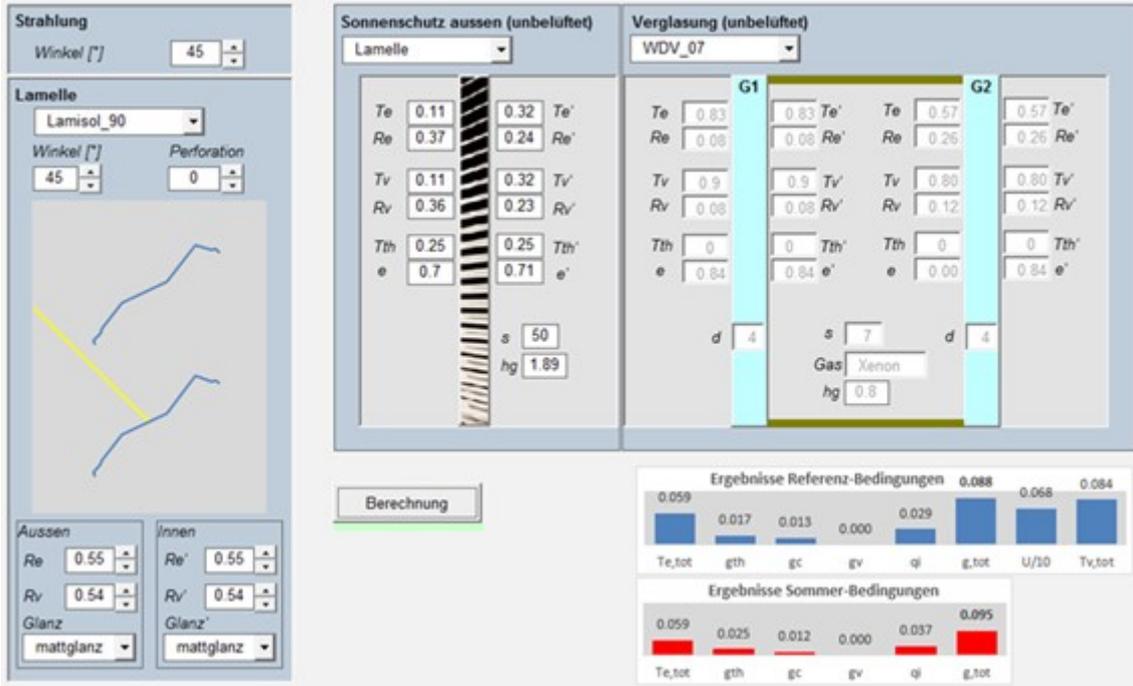


Abbildung 11: Ergebnisse der Simulation mit einer 45° Lamellenstellung der Store

Berechnung nach EN ISO 52022-3 (EN 13363-2)

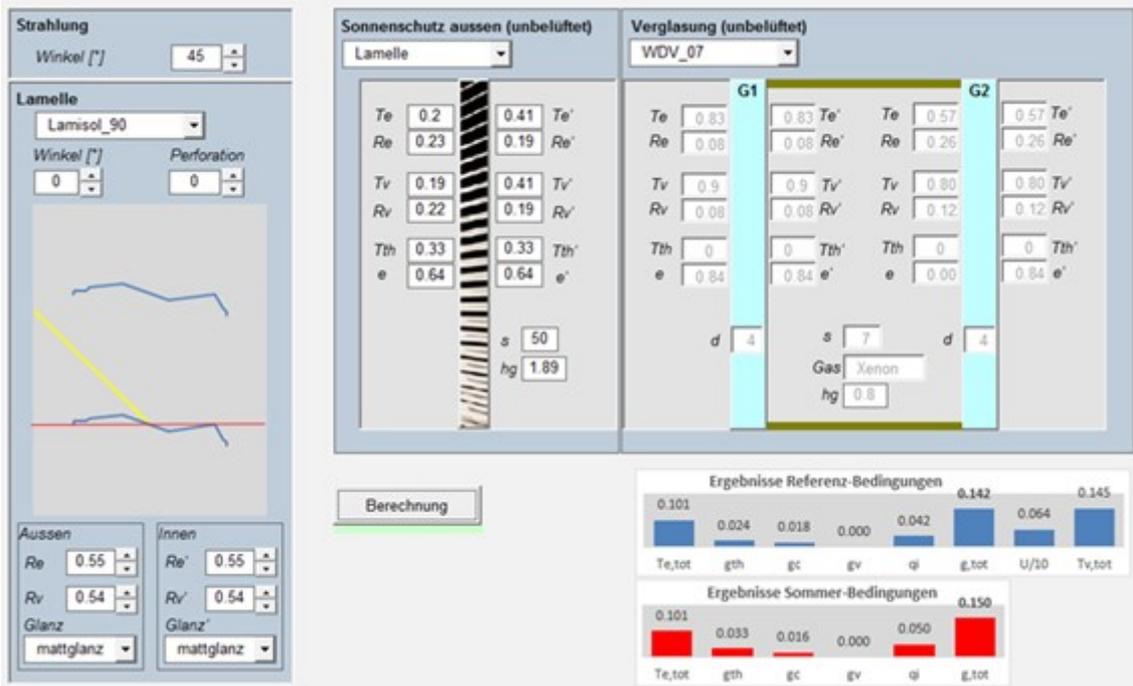


Abbildung 12: Ergebnisse der Simulation mit einer 0° Lamellenstellung der Store

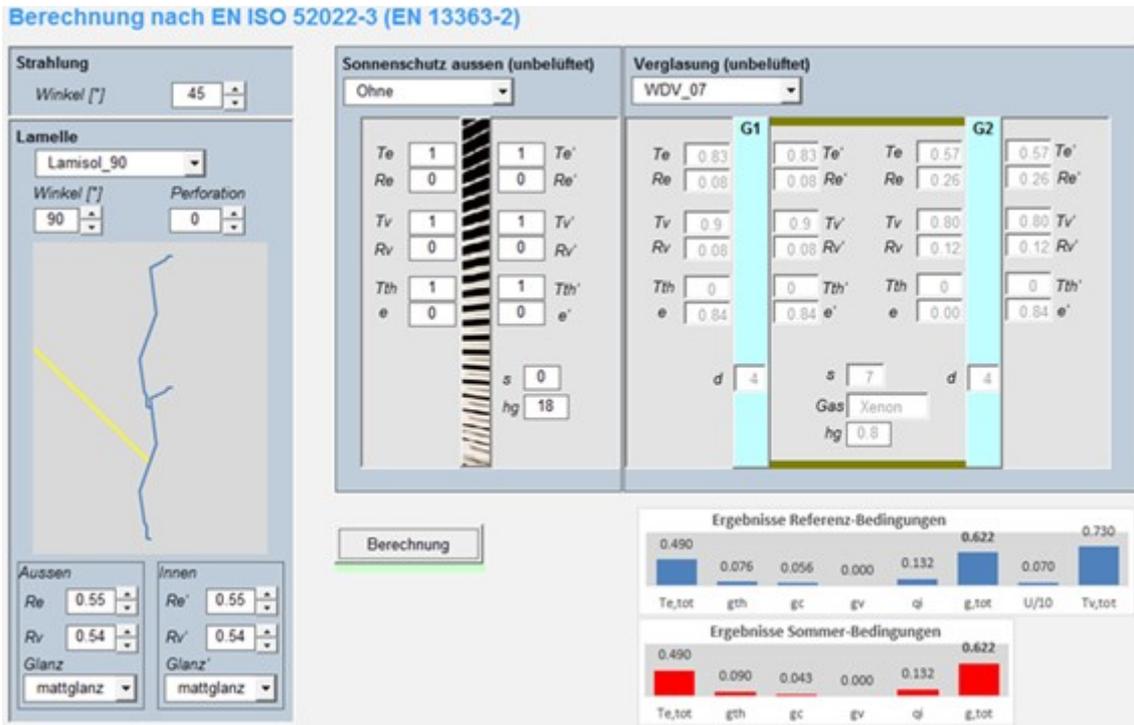


Abbildung 13: Ergebnisse der Simulation ohne Store, wobei sie dennoch auf der Grafik links erscheint

7.2 Meteororm-Einstellungen

Mit Hilfe der Software Meteororm [67, 68] wird der Standort Horw (47.013093 Nord, 8.305819 Ost) anhand von folgenden Parametern untersucht:

- Ein ganzes Jahr aufgeschlüsselt in Stundenwerte, d.h. 8'760 Messpunkte: Anhand der Stundenwerte kann analysiert werden, zu welcher Tageszeit an welchem Tag wieviel Strahlung auf eine Fassade trifft.
- Alle vier Himmelsrichtungen und die vier Nebenhimmelsrichtungen: Hiermit kann aufgezeigt werden, wie gross der Einfluss der unterschiedlichen Fassadenrichtungen bezüglich einfallender Strahlung ist.
- Mit aktiviertem Horizont: Der durch die Topologie der Umgebung definierte Horizont beeinflusst die einfallende Strahlung.
- Zeitperioden Strahlungsparameter und Temperaturparameter: Für den Strahlungsparameter werden die Periode 1991-2010 und für den Temperaturparameter die Periode 2000-2009 verwendet. Dies sind die aktuellsten vergangenen Zeitperioden.
- Monatliche 10-Jahresextreme der Temperatur und Strahlung: Für die monatlichen 10-Jahresextreme werden jeweils die Mittelwerte ausgewählt, was der Standardeinstellung entspricht.