

Stephan Schlitzberger, Christiane Schwenk
Barbara Falkenhof, Anna Bauer, Christoph Kempkes

**Abbau von Hemmnissen bei der
Umsetzung von in die Gebäudehülle
integrierten, innovativen und
zukunftsweisenden Komponenten und
Systemen**

F 3066

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0120-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Abbau von Hemmnissen bei der Umsetzung von in die Gebäudehülle integrierten, innovativen und zukunftsweisenden Komponenten und Systemen

Endbericht zum Projekt SWD – 10.08.18.7-16.17
vom 27. Dezember 2017

Forschungsprogramm

Zukunft Bau, eine Forschungsinitiative des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- u. Raumforschung

Projektlaufzeit

August 2016 bis Dezember 2017

Förderer:

Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Bearbeitet von

Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH
Leipziger Straße 184
34123 Kassel

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- u. Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.17). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst 139 Seiten inklusive Anhang. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder in sinnentstellendem Zusammenhang erfolgen.

Projektleitung:

Ingenieurbüro Prof.-Dr. Hauser GmbH
Dr.-Ing. Stephan Schlitzberger
Leipziger Str. 184
34123 Kassel
Telefon +49 (0) 561 / 494905
Fax +49 (0) 561 / 494935
Mail schlitzberger@ibh-hauser.de
Internet www.ibh-hauser.de

Bearbeitung:

- Dipl.-Ing. Christiane Schwenk
Mail: schwenk@ibh-hauser.de
Tel: 0561/94990434
- Dipl.-Ing. Barbara Falkenhof
Mail: falkenhof@ibh-hauser.de
Tel: 0561/94990435
- Dipl.-Ing. Anna Bauer
Mail: bauer@ibh-hauser.de
Tel: 0561/94990437
- Dipl.-Ing. Christoph Kempkes
Mail: c.kempkes@ibh-hauser.de
Tel: 0561/94990436

Förderer:

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Forschungsinitiative Zukunft Bau, Referat II 3
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Mitfinanzierende Stellen:

1. VEKA AG, Dieselstraße 8, 48324 Sendenhorst
2. EControl-Glas GmbH & Co. KG, Otto-Ebert-Straße 8, 08527 Plauen

Kassel, 27. Dezember 2017



Dr.-Ing. Stephan Schlitzberger

Hinweis:

Soweit im Text nicht anders gekennzeichnet, sind alle Grafiken und Bilder durch das Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH erstellt worden.

Inhalt

1	Einführung	7
1.1	Ausgangssituation und Ziele des Forschungsvorhabens.....	7
1.2	Vorbemerkungen zum Begriff "Intelligente Gebäudehülle"	7
1.3	Beschreibung der zu lösenden Probleme und Vorgehensweise	8
2	Marktrecherche	11
2.1	Intelligente Verglasungen	11
2.1.1	Literaturüberblick.....	11
2.1.2	Elektrochrome Schichten	12
2.1.3	Gaschrome (oder gasochrome) Schichten	13
2.1.4	Thermochrome und thermotrope Schichten	14
2.1.5	Elektrotrope Schichten.....	15
2.1.6	Photochrome und photoelektrochrome Schichten	17
2.2	Elemente an der Außenseite des Fensters.....	18
2.2.1	Elemente zur Verschattung und/oder Blendschutz	18
2.2.2	Elemente zur Verschattung und Tageslichtlenkung.....	20
2.3	Elemente zwischen den Scheiben, im Scheibenzwischenraum oder im Innenraum	21
2.3.1	Elemente zwischen den Scheiben zur Verschattung und/oder Blendschutz.....	21
2.3.2	Elemente zur Verschattung und Tageslichtlenkung.....	24
2.3.3	Systeme mit Elementen zur Wärmespeicherung.....	26
2.4	Fenster mit Elementen der TGA.....	27
2.4.1	Motorische Lüftungsklappen und Lüftungsfenster	27
2.4.2	Fenster mit Lüftungsfunktion.....	28
2.4.3	Fensterfalz- und Fensterlüfter	28
2.4.4	Fenstersysteme mit Lüftungsgerät zur Wärmerückgewinnung.....	29
2.4.5	Fassadensysteme mit Lüftungsgerät zur Wärmerückgewinnung	30
2.5	Multifunktionale Fassadensysteme	31
2.5.1	VEKA Kastenfenster.....	31
2.5.2	E ² -Fassade (Schüco)	32
2.5.3	TEmotion (Wicona)	33
2.5.4	Zwei-Grad-Fassade.....	34
2.5.5	Closed cavity Fassade.....	34
2.6	Fassadensysteme mit Elementen zur Wärmespeicherung – Transparente Wärmedämmung (kurz: TWD)	35
2.7	Systeme aus Forschung und Entwicklung	36
2.7.1	Verglasungen.....	36
2.7.2	Fassadensysteme	38
2.7.3	Elemente mit Formgedächtnis-Effekt	40
2.7.4	Entwicklungen aus Kunst, Design und anderen Fachgebieten	41
2.8	Zusammenfassung der Marktrecherche	42

3	Gebäudeautomation	45
3.1	Überblick über die Ebenen der Gebäudeautomation	45
3.2	Gebäudeautomation – Protokolle und Systeme	46
3.2.1	Kommunikationsprotokolle	46
3.2.2	Ethernet	47
3.2.3	KNX (Konnex-Bus)	47
3.2.4	EIB (Europäischer Installationsbus).....	48
3.2.5	BACnet.....	48
3.2.6	LON (Local Operating Network)	48
3.2.7	M-BUS	48
3.2.8	MODBUS/TCP	49
3.2.9	SMI49	
3.2.10	Motorlink.....	50
3.2.11	DALI50	
3.2.12	Funkbusse	51
3.3	Energieverbrauch Gebäudeautomation.....	51
3.4	Planung Gebäudeautomation	52
4	Richtlinien und Normen	53
4.1	VDI 3813 und VDI 3814	53
4.2	DIN EN 15232 Energieeffizienz von Gebäuden, Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement	53
4.2.1	Effizienzklassen	54
4.2.2	Einfache und detaillierte Effizienzfaktoren.....	55
4.2.3	Ausführliches Berechnungsverfahren	55
4.3	DIN EN ISO 16484	57
4.4	DIN V 18599.....	57
5	Projekte und Best-Practice-Beispiele	59
5.1	Projekte	59
5.1.1	benefit E	59
5.1.2	plusFASSADEN	59
5.1.3	DeAL - Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme.....	60
5.1.4	KonLuft – Energieeffizienz von Gebäuden durch kontrollierte Lüftung	60
5.1.5	AUTIFAS - Automatisierung innovativer Fassadensysteme mit integrierter technischer Gebäudeausrüstung unter Berücksichtigung von Behaglichkeitsaspekten.....	60
5.1.6	Glasarchitektur – Lehren aus einem Großversuch.....	61
5.1.7	Dissertation zum Planungs- und Schnittstellenmanagement auf Baustellen	61
5.1.8	Integrales Bauen und die Zukunft mit MSR	61
5.2	(Best) Practice Beispiele	62
5.2.1	Capricornhaus (E.ON Energy Trading Building).....	62
5.2.2	Haus ohne Heizung	62

6	Simulation – Parameterstudie	64
6.1	Randbedingungen Berechnung und Varianten	64
6.1.1	Berechnungsrundbedingungen	64
6.1.2	Parameter der Modellrechnungen	67
6.1.3	Bewertungsparameter	68
6.1.4	Variantenrechnungen	71
6.2	Auswertung der Berechnungen	74
6.2.1	Energiebedarf Kühlung und Heizung	74
6.2.2	Auswertung Energiebedarf für Lüftung und Beleuchtung	79
6.2.3	Auswertung Komfort.....	80
7	Kosten-Nutzen-Analyse	86
7.1	Kosten-Nutzen-Analyse für (außenliegende) Verschattungssysteme	86
7.1.1	Investitionskosten außenliegende Verschattung.....	86
7.1.2	Wartungs- und Instandhaltungskosten.....	88
7.1.3	Berechnung Mehraufwand Beleuchtung und Minderaufwand Heizung	89
7.1.4	Gegenüberstellung mit Bewertung.....	90
7.2	Kosten-Nutzen-Analyse für automatisierte Verschattungseinrichtungen	91
8	Hemmnisse	93
8.1	Forschung Innovationsverhalten.....	94
8.1.1	Überblick	94
8.1.2	Forschung zu Innovationshemmnissen in Deutschland.....	95
8.2	Hemmnisse bei Planung und Berechnung	96
8.2.1	Konventioneller Planungsprozess	96
8.2.2	Rechnerische Bewertung innovativer Komponenten	97
8.2.3	Planung Lüftungsanlage	100
8.2.4	Planung / Schnittstelle Gebäudeautomation.....	102
8.3	Hemmnisse im Entscheidungsprozess	103
8.3.1	Hemmnisse aus dem Blickwinkel von Bauherren und Investoren.....	103
8.3.2	Hemmnisse aus dem Blickwinkel des Architekten.....	103
8.3.3	Hemmnisse aus dem Blickwinkel des TGA-Planers.....	104
8.4	Hemmnisse bei der Umsetzung	105
8.4.1	Ausführende Firmen	105
8.4.2	Bauüberwachung	105
8.5	Produktspezifische Hemmnisse	105
8.5.1	Kosten	105
8.5.2	Fehlende Informationen	106
8.6	Vergütung der Planungsleistung	106
8.6.1	Objektplanung - Gebäude und Innenräume	107
8.6.2	Technische Gebäudeausrüstung.....	108
8.6.3	Bauphysik	108
8.6.4	Bewertung.....	109

9	Abbau von Hemmnissen	111
9.1	Forschung – Überwindung von Innovationsbarrieren	111
9.2	Information	111
9.2.1	Fort- und Weiterbildung	112
9.2.2	Bereitstellung von herstellerunabhängigen Informationen	112
9.2.3	Herstellerinformationen	112
9.2.4	Carbon Footprint und Life-Cycle-Analyse	113
9.3	Gremien-, Verbände- und Normungsarbeit	113
9.4	Auf der Baustelle: Schnittstellenproblematik	114
9.5	Marketing und Forschung	114
9.6	Integrale Planung und Kommunikation	115
9.6.1	Gegenüberstellung von konventioneller und integraler Planung.....	115
9.6.2	Der integrale Planungsprozess.....	116
9.6.3	Vorteile integraler Planung	118
9.6.4	Stärkung des Prozesses der integralen Planung	118
10	Zusammenfassung	120
	Abbildungsverzeichnis	133
	Tabellenverzeichnis	136
	Anhang A Übersichten intelligenter Systeme und Komponenten	137

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation und Ziele des Forschungsvorhabens

Zukunftsfähige Gebäude verfügen mittlerweile über Systeme und Komponenten in der Gebäudehülle, deren Aufgaben und Funktionen weit über die reinen Schutzfunktionen hinausgehen, die konventionelle Bauteile der Außenhülle von Gebäuden üblicherweise bereitstellen müssen. Moderne Fassadenelemente werden immer häufiger mit steuer- und regelbaren Komponenten ausgestattet, durch welche das Verhalten von Gebäuden in Bezug auf deren energetische Performance aber auch in Hinblick auf den thermischen, akustischen und visuellen Komfort entscheidend positiv beeinflusst werden kann. Je größer die Fähigkeit der Gebäudehülle ist, sich an veränderte äußere Randbedingungen anzupassen (z. B. tages- und jahreszeitabhängige Regelmechanismen), umso höher ist das energetische Einsparpotenzial bzw. umso wirkungsvoller lassen sich Komfortbedingungen verbessern.

Aus dem Einsatz innovativer Technologien und Komponenten erwachsen allerdings auch neue Herausforderungen bei der Planung, Ausführung und Nutzung des Gebäudes. Der Einsatz innovativer Komponenten bedeutet nicht selten eine Abkehr von etablierten Bauabläufe verbunden mit einer Neuausrichtung des Planungs- und Ausführungsprozesses. Solange nicht von Erfahrungswerten profitiert werden kann, bedeutet dies in der Regel auch einen höheren Planungs- und Koordinationsaufwand, der nur selten honoriert wird. So ergeben sich letztlich auf vielen Ebenen Hemmnisse bezüglich der Umsetzung von innovativen und zukunftsweisenden Elementen.

Zentrale Voraussetzung für den Abbau von Hemmnissen ist die umfassende Bereitstellung von Informationen für Planer, Bauherren und die ausführenden Gewerke. Möglichkeiten und Potentiale innovativer Komponenten müssen allseits bekannt sein, nur so können Entscheidungen zugunsten intelligenter Komponenten und Systeme getroffen werden. Sehr wichtig ist auch das Bewusstsein für die Einsparpotentiale (energetisch und monetär), die sich aus der Automatisierung von Komponenten ergeben, zu schärfen. Wartungs- und Betriebskosteneinsparungen können und sollten im Rahmen von Amortisationsrechnungen quantifiziert und kommuniziert werden. Auf diese Weise lassen sich die Potentiale innovativer Komponenten und intelligenter Fassaden deutlich besser vermitteln trotz unter Umständen zunächst höherer Investitionskosten.

Insbesondere auf der Ebene der Planer muss die Bereitschaft geweckt werden, sich mit neuen Komponenten und den damit verbundenen Herausforderungen auseinander zu setzen. Vor diesem Hintergrund ist wesentliches Ziel der Projektbearbeitung, das Spannungsfeld, in dem sich Hersteller, Bauherren und Planer bei der Realisierung innovativer und zukunftsweisender Komponenten und Systeme befinden, aufzuzeigen und Lösungsmöglichkeiten herauszuarbeiten, die zu einer stärkeren Verbreitung "intelligenter Fassaden" führen.

1.2 Vorbemerkungen zum Begriff "Intelligente Gebäudehülle"

Die Gebäudehülle übernimmt im Wesentlichen die Schutzfunktion für die im Gebäude befindlichen Menschen gegenüber Umwelteinflüssen. Hierzu zählen klimabedingte Einflüsse wie z. B. Wärme und Kälte, Regen, Wind und Sonneneinstrahlung. Zusätzlich gibt es aber auch durch den Menschen verursachte Umwelteinflüsse, wie Lärm, Gerüche oder Feinstaub.

Fenster und verglaste Elemente sind wichtige Elemente der Gebäudehülle. Als transparente Bauteile erlauben sie sowohl Lichteinfall in die Räume als auch den Eintrag von Solarstrahlung. Darüber hinaus übernehmen Fenster zusätzlich bei einem Großteil der Gebäude die Versorgung mit Frischluft.

Bei niedrigen Außentemperaturen kann die Solarstrahlung direkt und unproblematisch als Wärmequelle genutzt werden. Bei höheren Außentemperaturen können diese Wärmege-
winne sehr schnell zu Überhitzungserscheinungen führen, so dass Maßnahmen zum Son-
nenschutz erforderlich werden. Nachteil von Sonnenschutzvorrichtungen ist oftmals, dass
die Nutzung von Tageslicht nicht oder nur eingeschränkt möglich ist.

Daraus ergeben sich bei der Planung der Gebäudehülle eine Vielzahl von zu berücksichti-
genden Anforderungen. Neben den öffentlich-rechtlichen Anforderungen (wie z. B. Einhal-
tung des Wärmeschutzes) müssen auch menschliche, ökologische und nicht zuletzt auch
ökonomische Bedürfnisse erfüllt werden. Hier gibt es in der Regel nur individuelle Lösun-
gen, pauschale Lösungen sind eher selten, bzw. führen zu weniger zufriedenstellenden
Ergebnissen.

Der Begriff „Intelligente Gebäudehülle“ ist schwer zu fassen. Verschiedenste Publikationen
und Bücher befassen sich mit „intelligenten Gebäudehüllen“, bzw. „intelligenten Fassaden“
(z. B. [1], [2]). Häufig wird auch der Begriff „adaptive Gebäudehülle“ benutzt (z. B. [3]).

Nach [2] hängt die Frage nach einer intelligenten Fassade direkt mit der Klärung des Begrif-
fes Intelligenz zusammen. Der Begriff Intelligenz kommt aus dem Lateinischen und bedeu-
tet wörtlich „wählen zwischen“ (legere: lesen, wählen; inter: zwischen). Der Begriff adaptiv
kommt ebenfalls aus dem Lateinischen und bedeutet „sich anpassen“.

Intelligenz ist in der Psychologie ein Sammelbegriff für die kognitive Leistungsfähigkeit des
Menschen. Überträgt man diesen Begriff auf die Fassade, bedeutet dies, dass die Fassade
über kognitive Fähigkeiten verfügen müsste, also über Denkvermögen, Auffassungsgabe,
Rationalität, Logik und Urteilsvermögen. Frage ist, ob die Nachbildung menschlicher Intel-
ligenz in der Fassade in diesem Sinne überhaupt möglich ist. Ist die Fassade umso intelligen-
ter, je mehr sie technisch leisten kann? Die o. g. Publikationen stimmen darin überein, dass
dies grundsätzlich nicht möglich ist. In [1] wird darauf hingewiesen, dass große Vorsicht
geboten sei, unbelebte Mechanismen (engl. „inanimate mechanism“) mit dem Begriff
Intelligenz zu beschreiben, sinnvoller sei es in diesem Zusammenhang von künstlicher Intel-
ligenz zu sprechen.

In diesem Sinne können Fassaden bzw. Gebäudehüllen als technisch intelligent bezeichnet
werden, wenn sie einerseits über differenzierte Regelungsmöglichkeiten verfügen, z. B. für
Sonnen- und Blendschutz oder Tageslichtnutzung, um den Bedürfnissen und Anforderun-
gen der Nutzer bestmöglich nachzukommen, andererseits aber auch den aufzuwendenden
Energieeinsatz minimieren.

Im vorliegenden Projekt werden keine Komponenten berücksichtigt, die *ausschließlich* zur
additionalen Erzeugung von Strom oder Wärme in die Fassade integriert sind und über kei-
ne darüberhinausgehenden Funktionen verfügen. Dazu zählen insbesondere Photovoltaik-
anlagen, aber auch Solarkollektoren zur Bereitstellung von Wärme für Trinkwasser und Hei-
zung oder zur Luftvorwärmung. Diese Thematik wird sehr ausführlich im Projekt „benefit E“
[4], das von Dezember 2013 bis Oktober 2015 an der TU Darmstadt durchgeführt wurde,
behandelt.

1.3 Beschreibung der zu lösenden Probleme und Vorgehensweise

Gegenstand der Projektbearbeitung ist die Auseinandersetzung mit innovativen Kompen-
ten und Systemen in der Gebäudehülle und das Identifizieren von Hemmnissen, die einer
Realisierung solcher Systeme entgegenstehen bzw. die überwunden werden müssen.

Als großes Hemmnis bezüglich der Umsetzung kann vor allem das unzureichende Wissen
von der Existenz und den Potenzialen unterschiedliche Komponenten gelten. Deshalb
erfolgt in Kapitel 2 zunächst die Dokumentation einer breit angelegten Marktrecherche. In
der Marktrecherche wird unterschieden zwischen intelligenten Verglasungen, Elementen

für Sonnenschutz, Blendschutz und Tageslichtlenkung, Elementen der technischen Gebäudeausrüstung, die in die Fassade oder in das Fenster integriert sind, multifunktionalen Fassadensystemen und Fassadensystemen mit Elementen der Wärmespeicherung. In allen Bereichen bietet der Markt eine Vielzahl von Möglichkeiten. Die Aufgabe der Planer besteht hier vor allem darin, die passende Komponente auszuwählen.

Die Gebäudeautomation spielt im Kontext intelligenter Komponenten eine zentrale Rolle, da intelligente Komponenten zumeist nur in Kombination mit einer sinnvoll aufgebauten Gebäudeautomation ihre Möglichkeiten voll entfalten können. Deshalb erfolgt in Kapitel 3 hierzu - aufgrund der besonderen Bedeutung der Gebäudeautomation - eine explizite Auseinandersetzung, in der zum einen die am häufigsten verwendeten Systeme der Automations- und Feldebene vorgestellt werden, zum anderen Planungshinweise gegeben werden.

Einen Überblick über Normen und Richtlinien, die sich mit Elementen der Gebäudeautomation und intelligenten Systemen beschäftigen, liefert Kapitel 4. Ausgewählte Projekte und zwei Best-Practice-Beispiele werden in Kapitel 5 vorgestellt.

Im sich daran anschließenden Kapitel 6 werden die Ergebnisse exemplarischer Simulationsrechnungen zu innovativen Komponenten vorgestellt. Steuer- und regelbare Komponenten werden als eigene Systemeinheiten oder als Elemente der Gebäudehülle entweder mit dem Ziel der Energieeinsparung oder zum Zweck der Komfortverbesserung eingesetzt. Energieeinsparereffekte werden im Wesentlichen durch Vermeidung eines Energieaufwands für die Gebäudekühlung erzielt. Zusätzliche Einsparpotenziale ergeben sich aber auch - und insbesondere im Gebäudebestand - durch einen temporären Wärmeschutz, wobei innere oder äußere Abschlüsse von Fenstern in der Heizperiode in den Nachtstunden genutzt werden, um einen zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstand (Wärmedurchlasswiderstand des Abschlusses selbst und der Luftschicht zwischen Abschluss und Fenster) zur Reduzierung der Wärmeverluste aufzubringen. Zur Quantifizierung der Wirkung von temporären Wärmeschutzvorrichtungen wird an dieser Stelle auf das Forschungsprojekt „Energetische Bewertung von Einrichtungen für den Sonnen- und Sichtschutz als thermischer Abschluss von transparenten Bauteilen - Quantifizierung der Wirkung und normative Bewertung“ verwiesen, welches im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft BAU unter dem Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-15.14 bearbeitet wurde.

Große Einsparpotenziale bezüglich des Energieaufwands für Gebäudekühlung lassen sich z. B. durch einen einstrahlungsabhängig betriebenen Sonnenschutz oder durch die Nutzung natürlicher Nachtlüftung erschließen. Wird ein Gebäude nicht aktiv gekühlt, lassen sich die positiven Auswirkungen eines automatisch betriebenen Sonnenschutzes oder auch von automatischen Lüftungssystemen nicht energetisch quantifizieren, stattdessen aber z. B. auf Basis einer Komfortbewertung nach DIN EN 15251 gegenüber nicht automatisch bedienten Systemen darstellen. Verbesserungen im Bereich der Tageslichtnutzung lassen sich sowohl energetisch durch vermiedenen Kunstlichtstrombedarf als auch über verbesserten visuellen Komfort (Tageslichtquotient) darstellen. Neben der rein qualitativen Beschreibung vorgenannter Einsparereffekten ist es wichtig, die Einsparpotenziale auch zu quantifizieren. Deshalb werden im Rahmen der Projektbearbeitung anhand exemplarische Simulationsrechnungen für ausgewählte Systeme einerseits die erzielbaren energetischen Einsparungen, andererseits Komfortverbesserungspotenziale quantifiziert.

Teilweise basierend auf den Simulationsergebnissen aus Kapitel 6 werden in Kapitel 7 zwei exemplarische Kosten-Nutzen-Rechnungen vorgestellt. In der ersten Berechnung erfolgt die Aufschlüsselung der Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten einer außenliegenden Verschattung mit herkömmlichen Jalousien über einen Nutzungszeitraum von 20 Jahren. Gegenüber einer innovativen, schaltbaren Verglasung müssen hier nicht nur die Mehrkosten für Wartung und Instandhaltung, sondern auch die Mehrausgaben für die

Raumbeleuchtung berücksichtigt werden. Dieser Berechnungsgang zeigt anhand der Darstellung der Gesamtkosten, in welches Preistraster innovative Komponenten passen müssen, um nicht von vornherein wegen zu hoher Investitionskosten auszuschneiden.

In der zweiten Kosten-Nutzenrechnung werden zur Verdeutlichung der Einsparpotentiale für ein System mit Raumkühlung die über den Nutzungszeitraum anfallenden Kühlkosten für ein automatisiertes Verschattungssystem und ein System mit manueller Verschattung gegenübergestellt.

Analysen ausgeführter Objekte und Kurzinterviews mit Planern zeigen, dass die Realisierung innovativer Komponenten und Systeme teilweise große Herausforderung an Planung und Bauausführung stellt. Von zentraler Bedeutung sind hier vor allem die Anpassung etablierter Bauabläufe und der zusätzliche Koordinierungsbedarf einzelner Gewerke. Eine grundsätzliche Betrachtung der Hemmnisse erfolgt in Kapitel 8. Dazu wird zunächst ein kurzer Einblick in die wissenschaftliche Forschung zu Innovationswiderständen gegeben. Anschließend werden die Hemmnisse, die bei der Realisierung innovativer Komponenten in der Fassade auftreten, detailliert beschrieben. Die Hemmnisse werden dazu unterteilt in Hemmnisse bei Planung und Berechnung, auf der Baustelle, die Akteure betreffend, das Produkt betreffend und Hemmnisse bei der Honorierung.

Im abschließenden Kapitel 9 werden Maßnahmen zum gezielten Abbau von Hemmnissen vorgestellt. Eine zentrale Rolle nimmt dabei die Bereitstellung von Informationen zu den grundlegenden Vorteilen innovativer Komponenten ein. Wichtig ist zudem, im Detail dafür zu sorgen, dass neue Komponenten problemlos geplant und installiert werden können. Eine wesentliche Rolle spielt nicht zuletzt auch die integrale Gebäudeplanung sowie eine gute Kommunikation unter allen Beteiligten.

2 Marktrecherche

Dieses Kapitel dokumentiert die zu Beginn der Projektbearbeitung durchgeführte Markt- und Literaturrecherche, die sowohl einen Überblick über die am Markt verfügbaren Produkte im Kontext der intelligenten Gebäudehülle als auch die relevante Literatur erfasst. Die Ergebnisse der Recherche sind im vorliegenden Abschnitt zusammenfassend dargestellt.

Die Einteilung der Systeme erfolgt anhand der Position der jeweiligen Produkte am Gebäude. Grundsätzlich wird unterschieden, ob die Systeme dem Fenster oder aber der Fassade zuzuordnen sind. Bei den Systemen, die dem Fenster zuzuordnen sind, wird zusätzlich unterschieden, ob sie sich -von außen betrachtet- vor dem Fenster, zwischen den Scheiben (bei Kastenfenstern), im Scheibenzwischenraum (einer Mehrscheibenverglasung) oder hinter der Scheibe befinden. Intelligente Verglasungen werden in einem gesonderten Abschnitt betrachtet. Systeme aus Forschung und Entwicklung, die noch keine Marktreife erlangt haben, werden ebenfalls in einem eigenen Abschnitt behandelt. Eine tabellarische Übersicht der recherchierten Systeme befindet sich in Anhang A.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Marktrecherche vorwiegend internetbasiert ist und die in den einzelnen Unterkapiteln vorgestellten Produkte exemplarisch ausgewählt wurden. Es besteht daher kein Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 Intelligente Verglasungen

Seit etlichen Jahren werden schaltbare Schichten für den Einsatz in Fenstern entwickelt. Inzwischen haben einige der Technologien Marktreife erreicht. Im Folgenden werden die Anwendungsmöglichkeiten und die Einsatzbedingungen der unterschiedlichen Technologien vorgestellt. Grundsätzlich werden die Systeme je nach Art der Aktivierung der optischen Schaltung unterschieden bzw. nach deren Aufbau.

2.1.1 Literaturüberblick

Einen sehr guten und umfassenden Überblick über die verschiedenen Systeme gibt das Themeninfo "Schaltbare und regelbare Verglasungen" des BINE Informationsdienstes aus dem Jahr 2002 [5]. Einige, in der Themeninfo vorgestellten Produkte, haben inzwischen Marktreife erlangt und werden in größerem Maßstab vertrieben, andere Produkte wiederum konnten sich nicht durchsetzen und die Entwicklung wurde eingestellt.

Einen geringfügig aktuelleren Überblick gibt S. Heusing in "Stand der Anwendungen der Elektrochromie in der Architektur" [6] aus 2006, der sich aber im Wesentlichen nicht sehr von [5] unterscheidet.

In seiner Dissertation "Schaltbare optische Schichten" beschäftigt sich C. Salanga ausführlich mit dem gasochromen Schaltvorgang von Wolframoxid [7]. Im einführenden Kapitel wird ein sehr guter Überblick über die physikalischen und chemischen Vorgänge schaltbarer Verglasungen gegeben.

In der HLH – einer anwendungsorientierten Zeitschrift für TGA-Planer des VDI – ist 2012 der Übersichtsartikel "Elektrooptische Fenster" von R. Bäckmann [8] erschienen, dieser gibt einen Überblick über neue Fenster- und Verschattungstechnologien, insbesondere aber über elektrooptische Fenster.

Anzumerken ist, dass in regelmäßigen Abständen Übersichtsartikel in Architekturzeitschriften und auf News-Seiten des Internets über schaltbare Verglasungen erscheinen. Diese Artikel sind allerdings zumeist aus dem Blickwinkel von Architekten für Architekten verfasst und beinhalten üblicherweise keine detaillierten technischen Angaben oder Details zu Planung und Realisierung.

2.1.2 Elektrochrome Schichten

Elektrochrome Schichten ändern ihre optischen Eigenschaften durch Aufnahme und Abgabe von Ionen bei gleichzeitigem Ladungsausgleich durch Elektronen. D. h. sobald eine Spannung angelegt wird und elektrischer Strom fließt, findet der erwünschte Ladungstransfer statt und die Schicht ändert ihre Durchlässigkeit für Sonnenlicht. Ein Flüssig- oder Polymer-Elektrolyt gewährleistet dabei den Stromfluss.

Wesentlicher Bestandteil elektrochromer Verglasungen ist Wolframoxid. Dieses färbt sich aufgrund der zunehmenden Absorption im nahen Infrarot und im roten sichtbaren Bereich bläulich ein. In elektrochromen Verglasungen befindet sich die aktive Schicht in einem Verbund, der von zwei mit transparenten Elektroden beschichteten Gläsern eingerahmt wird. Durch die externe Stromversorgung werden bei Bedarf Ladungsträger in die Schicht transportiert.

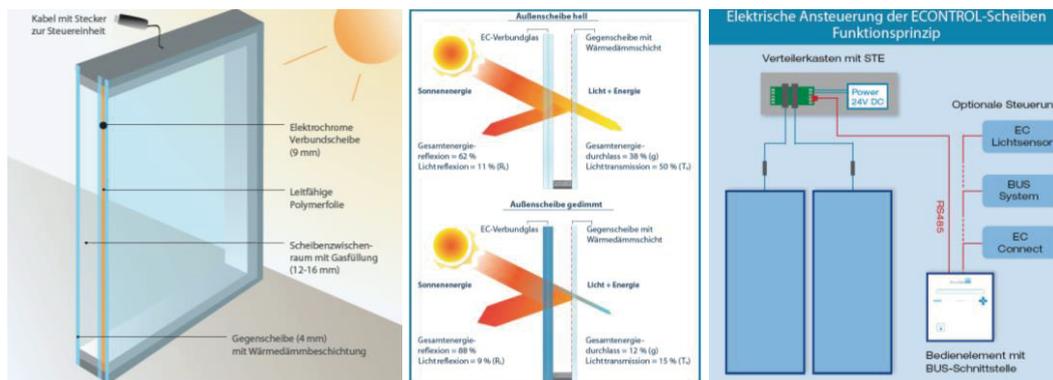


Abbildung 2-1: Aufbau der elektrochromen Verglasung am Beispiel von ECONTROL® [9]

Bei elektrochromen Fenstern lässt sich die Transmission stufenlos verändern, der Schaltvorgang dauert bis zu 20 Minuten. Die Durchsicht bleibt erhalten, allerdings findet eine Einfärbung des Glases statt. Der g-Wert der Verglasung kann auf bis zu 10 % reduziert werden. Elektrochrome Verglasungen gewährleisten Sonnenschutz, nicht aber Blendschutz. [9].



Abbildung 2-2: Elektrochrome Verglasungen von ECONTROL [9] im abgedunkelten Zustand

Zur Schaltung der elektrochromen Beschichtung ist jede der elektrochromen Scheiben über eine elektrische Zuleitung mit einer Steuereinheit verbunden. Über Bedienelemente können einzelne Büros oder ganze Fassaden und Dächer gleichzeitig gedimmt werden. Eine Schnittstelle im Bedienelement ermöglicht die automatische und stufenlose Steuerung mittels Lichtsensor, wahlweise vom Rechner aus oder über ein Bussystem der Gebäudeleittechnik. Eine manuelle Steuerung ist ebenfalls möglich.

Hersteller elektrochromer Gläser:

- ECONTROL [9]
- Gesimat [10]

- Glaswerke-Arnold (Isolar) [11]
- Sage-Glas (USA) [12]
- Chromogenics (Schweden) [13]

2.1.3 Gaschrome (oder gasochrome) Schichten

Bei gaschromen Verglasungen besteht die optisch schaltbare Schicht - wie auch bei elektrochromen Verglasungen - aus Wolframoxid. Durch Zuführung von Wasserstoffgas und der damit verbundenen Veränderung der Gasmischung im Scheibenzwischenraum färbt sich diese im abgedunkelten Zustand blau. Die Durchsicht bleibt erhalten, die Transmission verringert sich jedoch auf bis zu 10 %.

Die Schicht entfärbt sich wieder bei der Zufuhr von Sauerstoff. Der zur Einfärbung der Wolframschicht benötigte Wasserstoffanteil ist sehr gering und wird durch einen Katalysator direkt aus der Gasphase genommen. Zur Entfärbung wiederum reicht das Beaufschlagen mit sauerstoffhaltigem Gas, z.B. Luft. Dieser Prozess ist reversibel und benötigt im Gegensatz zu elektrochromen Verglasungen keine Stromzufuhr.

Zur Realisierung einer gaschromen Verglasung ist ein Versorgungsgerät erforderlich. Es muss die Gasflüsse regeln, also Wasserstoff und Sauerstoff einspeisen und zurückholen können.

Grundsätzlich sind die Schaltzeiten deutlich kürzer als bei elektrochromen Gläsern, unter anderem, da der Schichtaufbau einfacher ist.



Abbildung 2-3: links: Prinzipieller Aufbau eines gaschromen Systems (s. a. [7]), Mitte: Gasanschluss für gaschrome Verglasung (s. a. [14]); rechts: Elektrolyseur im Versorgungspaneel (s. a. [14])

2002 wurde ein Forschungsprojekt unter der Beteiligung der Firma Interpane und des Fraunhofer ISE zu gaschrom schaltenden Beschichtungen abgeschlossen [14]. Das Projekt konnte grundsätzlich erfolgreich durchgeführt werden und den Nachweis der Funktionsfähigkeit von gaschromen Verglasungen erbringen. Im Rahmen der Projektlaufzeit und auch danach war es allerdings nicht möglich, gaschrom arbeitende Schichten für größere Flächen herzustellen, zudem stellte sich die Integration des Gasversorgungsgerätes als problematisch heraus. Die weitere Forschung hierzu wurde deshalb eingestellt. Nach Kenntnis der Autoren sind keine gaschromen Verglasungen am Markt erhältlich.

2.1.4 Thermochrome und thermotrope Schichten

Thermochrome und thermotrope Schichten reagieren selbstständig auf Temperaturänderungen mit verändertem Transmissionsvermögen. Prinzipiell kann man zwei Materialklassen unterscheiden. Der allgemeinere Begriff "Thermotrope Materialien" umfasst Stoffe, die auf eine Temperaturänderung mit einer optischen erkennbaren, meist reversiblen Transmissionsverminderung reagieren, während sich das Absorptionsverhalten kaum ändert. "Thermochrome" Materialien ändern dagegen nicht nur ihre Transmissions- und Reflexionseigenschaften, sondern auch das Absorptionsverhalten.

Thermochrome Systeme:

Thermochrome Schichten ändern ihre Farbe, sobald eine bestimmte Temperatur in der Schicht überschritten wird. Thermochrome Schichten können sich z. B. als Zwischenlagenfolie zwischen zwei Scheiben befinden.

In thermochromen Schichten kommt üblicherweise Vanadiumdioxid zum Einsatz (s. a. [5], [7]). Reines Vanadiumoxid geht bei einer Schalttemperatur von 68 °C von einem metallischen und im IR-Bereich stark reflektierenden Zustand in einen halbleitenden und im IR-Bereich transparenteren Zustand über. Diese Temperatur kann durch Beimischung von Wolfram auf unter 30 °C gesenkt werden [7]. Die Schaltung erfolgt selbsttätig infolge der Aufheizung der Scheiben durch die absorbierte Sonnenenergie. Die Einfärbung wird umso tiefer, je höher sich die Scheibe aufheizt.

Thermochrome Schichten benötigen keinen elektrischen Energieaufwand zum Schalten, der damit verbundene Nachteil ist, dass sie nicht steuer- und regelbar sind.

Anders als in [5] und [7] angenommen, sind mittlerweile thermochrome Verglasungen für den Gebäudebereich am Markt erhältlich.



Abbildung 2-4: Schaltvorgang thermochrome Verglasung von Gesimat [10]

Hersteller thermochromer Gläser:

- Gesimat [10], erhältlich als 2- und 3-fach Wärmeschutzverglasung

Thermotrope Systeme:

Bei diesem System schalten Schichten, die auf der Basis von *Hydrogelen* oder *Gießharz* aufgebaut sind, hauptsächlich vom transparenten Ausgangszustand in einen streuenden weißen Zustand. Die zwischen zwei Schutzschichten platzierte thermotrope Schicht ist transparent. Durch diese Anordnung wird direkt ein Verbundglas gebildet.

Dieser Effekt wird im Fall des *Hydrogels* durch eine temperaturabhängige Durch- bzw. Entmischung von Matrix- und darin enthaltenem Streumaterial erreicht. Die Brechungsindizes der beiden Materialien sind unterschiedlich. Bei tiefer Temperatur sind die beiden Materialien homogen durchmischelt. Bei höherer Temperatur kommt es zur Phasenseparation und die Schicht wird opak.

Demgegenüber wird der trübe Zustand bei den thermotropen Schichten auf *Gießharzbasis* durch eine temperaturabhängige Änderung des Brechungsindex des Streumaterials (z.B.

mikroverkapselte Paraffine) erreicht. Der klare Zustand bei tiefen Temperaturen resultiert aus identischen oder annähernd gleichen Brechungsindizes beider Materialien. Steigt die Temperatur über einen bestimmten Wert, ändert sich der Brechungsindex der zugemischten Komponente sprunghaft und sie wird zum Streumaterial. Das System verliert seine Transparenz und wird opak.

Die Schalttemperaturen der thermotropen Systeme lassen sich im Rahmen der Temperaturen, die für einen Außeneinsatz nötig sind, durch entsprechende Modifikationen bei der Herstellung einstellen. Der erreichbare Schalhub solcher Systeme variiert sehr stark: So kann eine Phasenseparation den solaren Gesamtergiedurchlass von $g = 70\%$ auf 10% senken, wobei die Lichttransmission von $\tau = 88\%$ auf 19% reduziert wird. Gießharzbasierte Produkte schalten hingegen lediglich von $g = 65\%$ auf 40% und $\tau = 80\%$ auf 40% .

Aufgrund mangelnder optischer Transparenz können solche Systeme nicht nur im Fassadenbereich, sondern vor allem im Bereich von Oberlichtern eingesetzt werden.

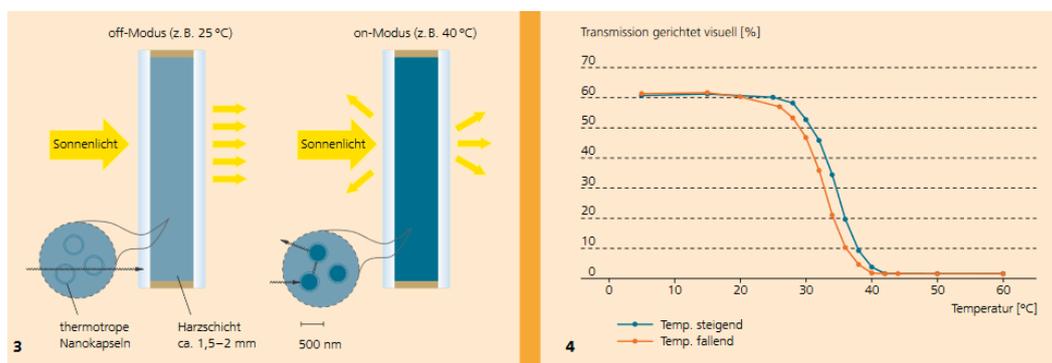


Abbildung 2-5: Schemaskizze Schaltvorgang von SolarDIM® eco und Transmission in Abhängigkeit der Scheibentemperatur [15]

Hersteller:

- Tilse GmbH ([16], [15])

2.1.5 Elektrotrope Schichten

Der elektrotrope Effekt beruht wie der thermotrope Effekt auf Hydrogelbasis auf der Lichtstreuung an eingebetteten Teilchen, deren Brechungsindex sich von ihrer Umgebung unterscheidet.

2.1.5.1 PDLC (Polymer-Dispersed-Liquid-Crystal) - Schichten

In sogenannte PDLC-Schichten eingebettete Flüssigkristalle mit anisotropem Brechungsindex sorgen im ungeordneten Zustand für eine starke Lichtstreuung. Legt man ein elektrisches Feld an, richten sich diese Flüssigkristalldomänen in Feldrichtung. Da der Brechungsindex des Matrixmaterials dem Brechungsindex dieser Ausrichtung angepasst ist, wird die Schicht transparent.

Da bei diesem elektrotropen System der Unterschied im Brechungsindex nur sehr gering ist, ändert sich die Gesamttransmission nicht, da lediglich gerichtete und gestreute Transmission unterschieden werden.

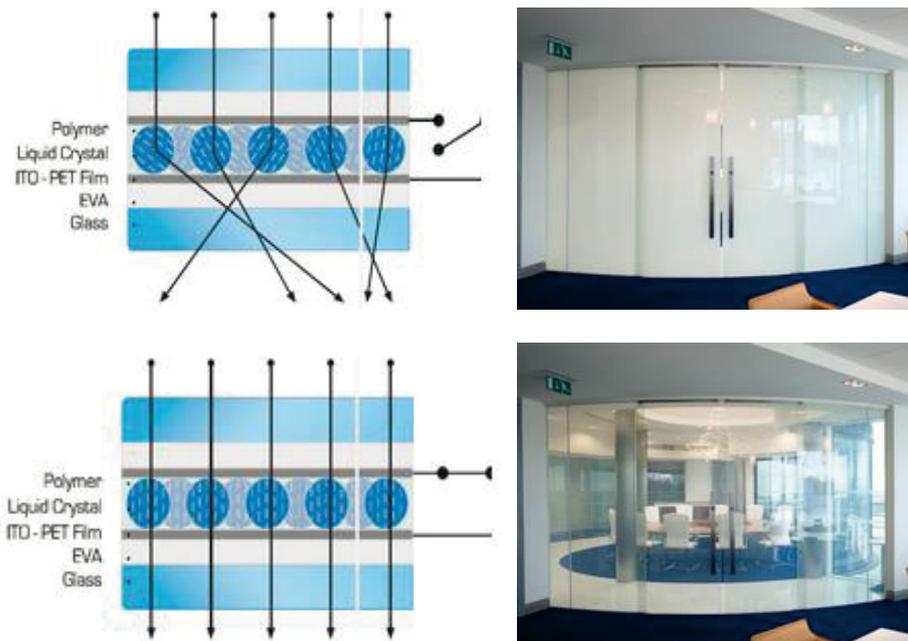


Abbildung 2-6: PDLC-Verglasung von Opak Smart Glas [17], oben: Stromkreis offen – Verglasung opak, unten: Stromkreis geschlossen – Verglasung durchsichtig

PDLC-Verglasungen gehören zu den schaltbaren Verglasungen, die erst beim Anlegen einer elektrischen Spannung durchsichtig werden. Ohne Stromzufuhr bilden sie eine milchigtrübe Glasfläche, die als wirksamer Sichtschutz oder auch als Projektionsfläche für Multimedia-präsentationen eingesetzt werden kann. PDLC-Verglasungen werden deshalb auch häufig als "Privacy-Glas" bezeichnet. Als Sonnenschutz eignen sie sich weniger, da sie keine Änderung der Lichttransmission und des g-Wertes bewirken, sondern nur undurchsichtig werden.

Hersteller:

- Licrivision™ [18]
- Opak Smart Glas [17]
- Gesimat [10]
- Glaswerke – Arnold [11]

2.1.5.2 SPD - Suspended-Particle-Devices

Das Funktionsprinzip von SPD – (Suspended-Particle-Devices) – Schichten ist dem der PDCL-Systeme sehr ähnlich. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die hier ausgerichtete Teilchen in einer Richtung stark absorbieren und dadurch die Scheibe im ausgeschalteten Zustand stark abdunkelt, die Durchsicht aber weitgehend erhalten bleibt. SPD-Systeme sind damit für den Einsatz als Sonnenschutz nutzbar. SPD-Systeme werden auch unter dem Begriff "LCW Solar Control Glazing" angeboten.

Anders als in [5] angenommen, sind mittlerweile mehrere Hersteller mit SPD-Verglasungen für den Gebäudebereich am Markt vertreten.

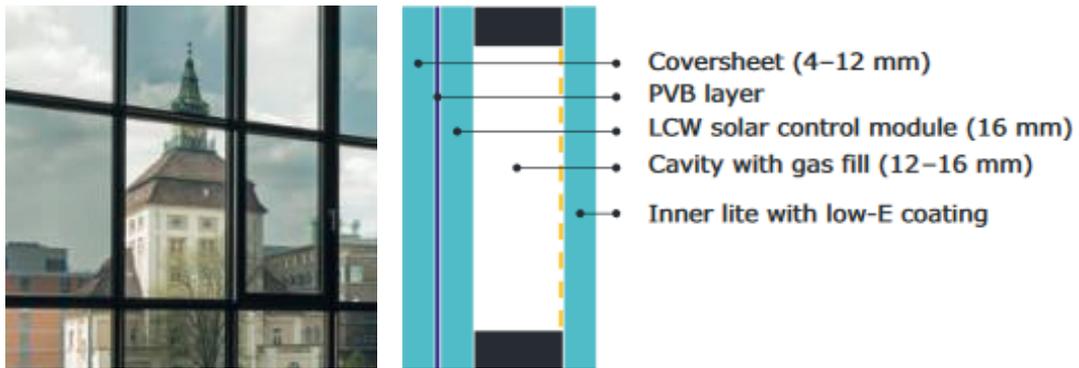


Abbildung 2-7: Licrivision™ - LCW Solar Control Glazing [18]

Hersteller:

- Licrivision™ [18]
- Research Frontiers (Smart Glass, USA, New York) [19]

2.1.6 Photochrome und photoelektrochrome Schichten

Photochrome Gläser oder Kunststoffscheiben finden sich z. B. in selbsttönenden Sonnenbrillen. Photochrome Systeme basieren auf Schichten mit Silberhalogeniden. Sie schalten unter UV- oder energiereicher sichtbarer Strahlung reversibel von einem transparenten in einen absorbierenden Zustand. Die erzielbare Transmissionsreduktion ist erheblich.

Die direkte Induzierung des Schaltens durch die Intensität der Sonnenstrahlung schließt jegliche Flexibilität und Regelbarkeit aus.

In photoelektrochromen Schichten werden die Wirkungsmechanismen einer elektrochromen Schicht und einer elektrochemischen Solarzelle kombiniert. Der Ladungstransfer erfolgt über transparente, elektrisch leitende Schichten auf Glassubstrat. Über einen externen Stromkreis wird die Schicht geschaltet: Ist der externe Stromkreis geöffnet, so färbt sich die Schicht unter Bestrahlung. Die Färbung bleibt erhalten, solange der Schalter geöffnet bleibt. Wird der externe Stromkreis später geschlossen, so entfärbt sich die Schicht. Es wird zur Schaltung also keine externe Strom- bzw. Spannungsversorgung benötigt.

2.2 Elemente an der Außenseite des Fensters

2.2.1 Elemente zur Verschattung und/oder Blendschutz

Im Folgenden werden die verschiedenen Systeme außenliegender Verschattungen vorgestellt. Grundsätzlich ist zwischen starren Systemen wie Auskragungen, variablen Systemen wie Außenjalousien oder Rollläden und verschiebbaren Systemen wie Klapp- oder Schiebeläden zu unterscheiden.

2.2.1.1 Starre Systeme

Typische feststehende, "starre" Systeme für den Sonnenschutz sind auskragende Bauteile, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Zu feststehenden Systemen gehören aber auch feststehende Sonnenschutzraster, z. B. feststehende Raster oder sog. Architekturgewebe. Diese Systeme funktionieren eigenständig und werden häufig in Kombination mit Sonnenschutzverglasung eingesetzt. g -Werte und F_c -Werte können für verschiedene Fassadenkonstruktionen berechnet werden (s. a. zum Beispiel [20]).



Abbildung 2-8: Starrer Sonnenschutz, links und Mitte: Architekturgewebe [20], rechts: feststehende Lamellen [21])

Hersteller (Auswahl):

- Haver und Boecker OHG [20]
- Colt International GmbH [21]
- GKD – Gebrüder Kufferath AG [22]

2.2.1.2 Variable Systeme

Standard der außenliegenden Verschattungssysteme sind Außenjalousien bzw. sog. Raffstoren. Der Markt bietet hier eine Vielzahl von Herstellern mit unterschiedlichsten Modellen und Systemen. Außenliegende Jalousien können manuell oder automatisiert aktiviert werden.



Abbildung 2-9: Beispiele für außenliegende Jalousien [23], [24]

Hersteller (Auswahl):

- Valetta Sonnenschutztechnik GmbH [23]
- Warema Renkhoff [24]

2.2.1.3 Verschiebbare und klappbare Systeme

Zu den verschiebbaren Systemen gehören zum Beispiel Klappläden oder Schiebeläden. Der Markt bietet auch hier verschiedenste Materialien und Produkte an. In Abbildung 2-10 ist exemplarisch ein verschiebbares System aus Streckmetall der Firma INGLAS [25] dargestellt. Wird eine Verschattung des Raumes gewünscht, muss zunächst das Element vor das Fenster bewegt werden. Hier wird die Verschattung ab einer definierbaren Sonnenhöhe (z.B. > 30°) gewährleistet. Der Außenbezug bleibt für die Blickrichtung erhalten. Der g-Wert ist auf die Nutzeranforderung abstimmbaar.



Abbildung 2-10: links: verschiebbares Sonnenschutzraster aus Streckmetall [25], Mitte: Faltläden [21], rechts: Klappläden [21]

Hersteller (Auswahl):

- Inglas Produktions GmbH [25]
- Colt International [21]

2.2.2 Elemente zur Verschattung und Tageslichtlenkung

Ein einfacher außenliegender Sonnenschutz verhindert oftmals die Durchsicht nach draußen. Sonnenschutzsysteme können mit Systemen zur Tageslichtlenkung kombiniert werden. Eine günstige Lamellenform erlaubt auf diese Weise ein hohes Maß an Durchsicht bei gleichzeitiger Verschattung. Zusätzlich können die Systeme so konfiguriert werden, dass eine Ausnutzung des Tageslichts auch in der Raumtiefe möglich wird. Verschiedene Lamellenformen sind möglich.

Bei der außenliegenden Verschattung von z. B. RETROSolar [26] sind die Lamellen in zwei Teilstücke gekantet: Ein erstes, steil angestelltes Teilstück dient der Sonnenausblendung, ein zweites, flacheres Teilstück dient der verbesserten Tageslichtausleuchtung. Die Jalousien ändern ihren Anstellwinkel in der Behanghöhe kontinuierlich, so dass der Blickwinkel nach außen kontinuierlich angepasst wird. Im Oberlicht erfolgt mit flacher Lamellenanstellung die Raumtiefenausleuchtung. Durch den unteren, geschlosseneren Behangteil wird der Schreibtischbereich sehr gut entblendet. Das System kann grundsätzlich auch in doppelschaligen Fassaden eingebaut werden.

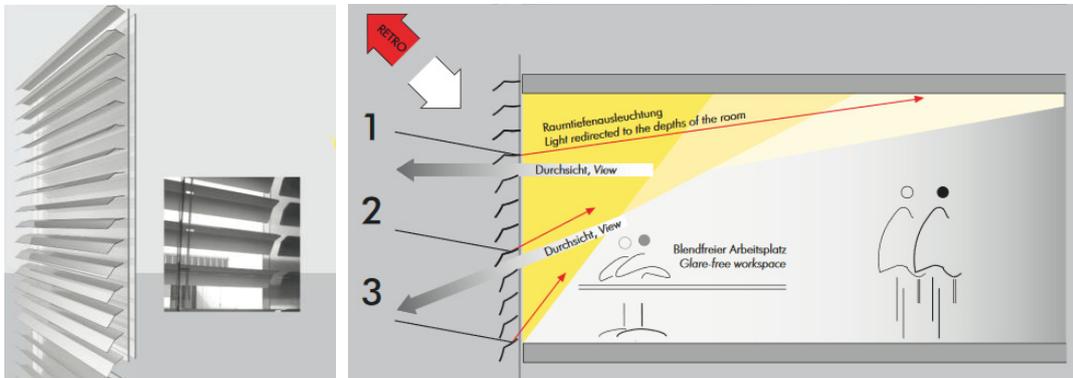


Abbildung 2-11: Außenraffstore Retrolux A von RETROSolar [26]

Eine weitere Möglichkeit außenliegender Verschattung mit Nutzung diffuser Einstrahlung bieten bewegliche Prismensysteme (z. B. von Siteco [27]). Die Prismenplatten werden motorisch dem Sonnenstand nachgeführt. So trifft die Direktstrahlung immer im Winkel von 90 Grad auf die Rückseite der Prismenplatten und wird reflektiert. Die einfallende Diffusstrahlung erhellt die gesamte Raumtiefe.

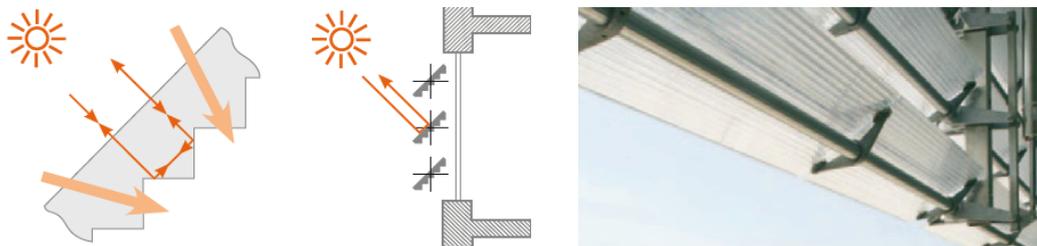


Abbildung 2-12: Bewegliches Prismensystem [27]

Bewegliche Prismenplatten können vertikal an Fassaden und horizontal über glasgedeckten Lichthöfen bzw. Glasdächern eingesetzt werden. Sie bestehen aus hochtransparentem Plexiglas (PMMA), sind unverspiegelt und witterungsbeständig.

Hersteller (Auswahl):

- RETROSolar [26]
- Siteco [27]

2.3 Elemente zwischen den Scheiben, im Scheibenzwischenraum oder im Innenraum

2.3.1 Elemente zwischen den Scheiben zur Verschattung und/oder Blendschutz

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, Verschattungselemente zwischen den Scheiben zu integrieren, die für eine effektive Verschattung in Abhängigkeit des Sonnenstandes sorgen. Grundsätzlich ist zwischen feststehenden Elementen und beweglichen Elementen zu unterscheiden.

2.3.1.1 Feststehende Elemente im Scheibenzwischenraum - Sonnenschutzraster

Seit 2009 das System "MicroShade™" am Markt verfügbar. MicroShade besteht aus einer 0,2 mm dicken Metallfolie, die in den Scheibenzwischenraum einer 2- oder 3-fach Low-E-Verglasung eingebracht wird. Die Metallfolie ist in einem definierten Winkel perforiert, so dass eine mikroskopisch feine Lamellenstruktur entsteht, s. a. Abbildung 2-13. Die Licht- und Energiedurchlässigkeit dieser Microlamellen variiert in Abhängigkeit vom Einfallswinkel automatisch: Nach Angaben des Herstellers werden im Sommer bei hohem Einfallswinkel bei einer 2-fach Verglasung g-Werte von 16 % bzw. 12 % für 3-fach-Verglasung erreicht. Im Winter, wenn die Sonne niedrig steht, wird bis zu 35 % der Sonnenenergie in das Gebäude gelassen.

Eine wesentliche Besonderheit von Microlamellen-Isolierglas ist die uneingeschränkte Durchsicht - auch im Sommer bei hohem Sonnenstand.



Abbildung 2-13: links: Fenster ohne und mit Microlamellen [28], rechts: Funktionsskizze Microlamelle [29]

Für einen vergleichbaren Effekt sorgen aber auch Gläser mit Einlagen aus Streckmetall oder Metallgewebe. Hier können aus verschiedenen Metallen und Beschichtungen individuelle Lösungen konfiguriert werden.



Abbildung 2-14: Sonnenschutzraster aus Metallgewebe (links) bzw. Streckmetall (rechts) von [30]

Solche Gläser werden zum Beispiel auch von Okalux angeboten (Produktname Okatech, [30])

Prismenscheiben können nicht nur außenliegend (siehe auch 2.2.1 sondern auch im Scheibenzwischenraum untergebracht werden. Sie leiten das einfallende Sonnenlicht bei niedrigem Einfallswinkel hindurch, so dass die einfallende Strahlung im Raum genutzt werden kann. Bei Sonneneinstrahlung mit hohem Einfallswinkel wird das Licht reflektiert. Einer Überhitzung kann so entgegengewirkt werden.

Prismenscheiben wurden bereits Ende der 90er Jahre entwickelt und gebaut, sie werden u. a. angeboten von GLASSX [31], INGLAS [25] und Siteco [27]

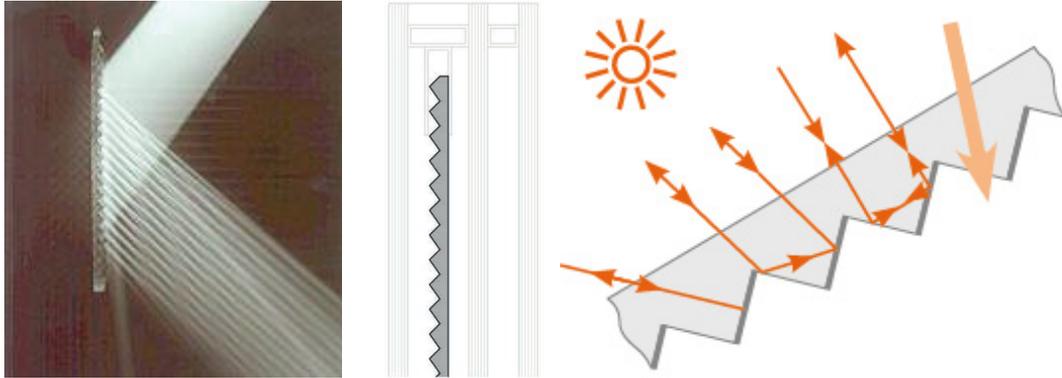


Abbildung 2-15: links: Prismenscheibe von INGLAS [25] Mitte: Prismenscheibe von GLASSX [31], rechts: Prismenscheibe von Siteco [27]

Die Prismenscheibe von GLASSX befindet sich im Zwischenraum zwischen der ersten und zweiten Scheibe, die Prismenscheibe ist 6 mm stark, der Scheibenzwischenraum ist 14 – 24 mm breit.

Bei der Prismenscheiben von Siteco ist die ebene Plattenseite nach außen gerichtet. Das im rechten Winkel auftreffende Sonnenlicht wird von den schrägen Prismenflanken zurückgeworfen. Die auf einer Prismenflanke aufgebrachte Aluminiumschicht reflektiert auch Lichtstrahlen aus flacheren Winkeln.

Je nach Einbausituation kann die Prismenscheibe auch zur Lichtlenkung eingesetzt werden: Hierbei wird die Brechung des Lichts an zwei nicht parallelen Flächen (Prisma) dazu genutzt, das Licht in Winkelbereiche des Raumes zu führen. So können Blendungen im Innenraum vermieden werden.

Eine weitere Variante stellt das Mikro-Sonnenschutzraster von Siteco [27] dar. Hier handelt es sich um ein mit Aluminium verspiegeltes Kunststoffraster mit sehr guten Reflexionseigenschaften. Speziell geformte Quer- und Längslamellen definieren den Sperr- und den Durchlassbereich für das Licht. Üblicherweise wird die geschlossene Lamellenoberfläche nach Süden, die Öffnung des Rasters nach Norden gerichtet. Dadurch wird direktes Sonnenlicht reflektiert, während das intensive Zenitlicht sowie das diffuse Tageslicht ungehindert in den Raum gelenkt werden, s. Abbildung 2-16.

Das Mikro-Sonnenschutzraster ist als feine Netzstruktur wahrnehmbar, bietet dem Betrachter aber gleichzeitig eine freie Sicht nach draußen. Die Raster sind hochempfindlich und müssen vollständig vor Feuchtigkeit und Schmutzpartikeln geschützt werden. Um eine umfassende Gewährleistung bieten zu können, werden die Systeme stets funktionsfertig geliefert, also in Zwei- oder Dreifachverglasungen verbaut. Das Sonnenschutzraster ist hauptsächlich für Dachverglasungen gedacht.

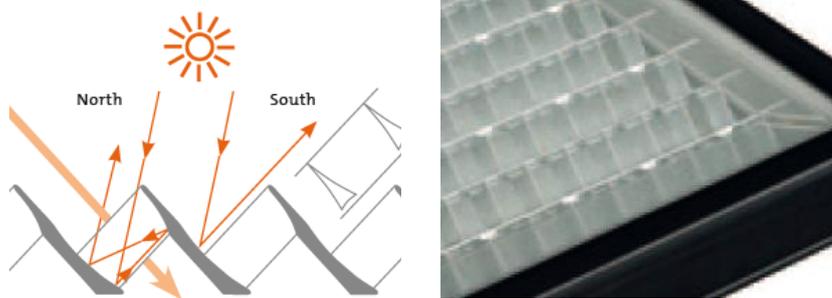


Abbildung 2-16: Micro-Sonnenschutzraster [27]

Das Mikro-Sonnenschutzraster kann auch mit zusätzlichem Blendschutz (s. Abbildung 2-17) ausgeführt werden.

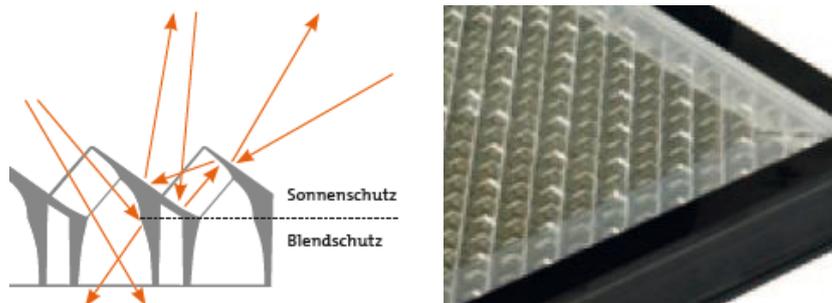


Abbildung 2-17: Micro-Sonnenschutzraster mit Blendschutz (CombiSol [27])

Hersteller (Auswahl):

- Inglas Produktions GmbH [25]
- Siteco [27]
- Okalux GmbH [30]
- MicroShade [32]
- GLASSX [31]

2.3.1.2 *Bewegliche Elemente im Scheibenzwischenraum*

Ähnlich wie die außenliegenden beweglichen Lamellensysteme aus Abschnitt 2.2.1.2 können auch zwischen den Scheiben Lamellensysteme angeordnet werden, die je nach Bedarf manuell oder automatisch aktiviert werden können. Großer Vorteil solcher Systeme ist, dass die Lamellen geschützt im Scheibenzwischenraum liegen und unabhängig von der jeweiligen Windsituation betrieben werden können.



Abbildung 2-18: Im Scheibenzwischenraum liegende bewegliche Verschattungen [33]

Hersteller (Auswahl):

- Screenline [33]
- Faltenbacher Jalousiebau [34]

2.3.2 *Elemente zur Verschattung und Tageslichtlenkung*

2.3.2.1 *Feststehende Elemente*

Tageslichtsystemen mit feststehenden Lamellen im Scheibenzwischenraum ermöglichen gleichzeitig Tageslichtnutzung sowie einen effektiven Sonnenschutz. Sie können für den Einsatz in der Fassade optimiert werden. Es können unterschiedliche Lamellen-Typen in einem Element kombiniert werden, im oberen Bereich wird Tageslicht zur Raumdecke gelenkt, im unteren Bereich erfolgt die Verschattung des Raumes.

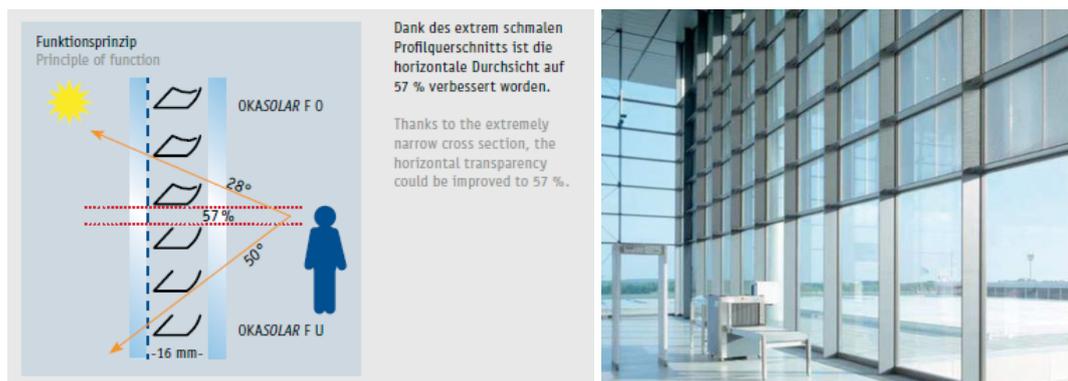


Abbildung 2-19: Sonnenschutz und Tageslichtlenkung (hier: Okasolar von Okalux [30])

2.3.2.2 *Sonnenschutz mit Kapillarglaseinlage*

Kapillareinlagen gehören zur Produktgruppe der transparenten Wärmedämmung. Eingebaut zwischen Verglasungen (2-fach oder 3-fach) streuen sie das Tageslicht tief in den Raum und bieten zugleich guten Sonnen- und Blendschutz. Der Lichttransmission und g-Wert der Verglasung können individuell abgestimmt werden ($g \geq 16\%$).



Abbildung 2-20: Verglasung mit Kapillarglaseinlage (hier: Kapilux von Okalux [30])

Kapillareinlagen sind auch in Verbindung mit U-Profilgläsern erhältlich, z. B. Okalux [30], Wacotech [35]

2.3.2.3 Fenstersysteme mit Aerogelfüllung

Aerogel-Füllung im Scheibenzwischenraum ermöglichen hochwärmegedämmte Fenster mit einem U-Wert von 0,3 W/(m²K). Wird Aerogel in Mehrstegplatten aus Kunststoff eingesetzt, liegt der U-Wert 0,54 W/(m²K).

Fenster mit Aerogelfüllung ermöglichen eine gute Tageslichtnutzung sind aber transluzent, d. h. eine Durchsicht von innen nach außen bzw. umgekehrt ist nicht möglich.

Fenstersysteme mit Aerogelfüllung sind z. B. erhältlich von Okalux (Produkt: Okagel [30]) oder Roda - Licht- und Lufttechnik GmbH (Produkt: Aerogel Lumira [36])



Abbildung 2-21: links: Okagel von Okalux [30], rechts: Lumira Aerogel [36]

2.3.2.4 Bewegliche Elemente

Vergleichbar zum unter 2.3.2.1 dargestellten System gibt es auch bewegliche Lamellen für den Scheibenzwischenraum bzw. als Innenjalousie. Die Lamellenposition ist frei einstellbar.

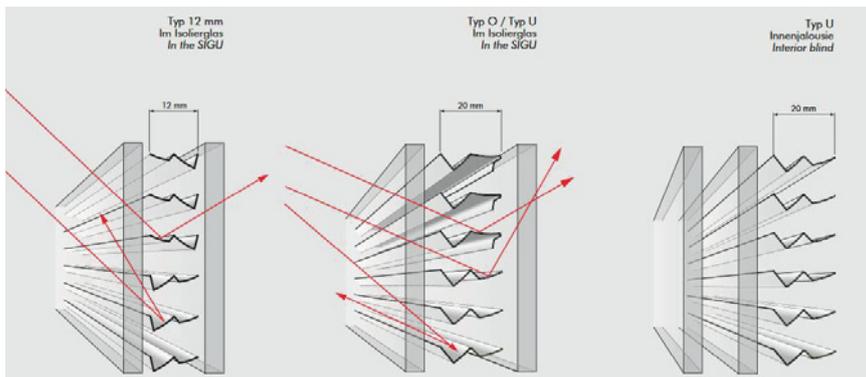


Abbildung 2-22: Bewegliche Lamellen im Scheibenzwischenraum für Verschattung und Tageslichtnutzung [26]

Speziell geformte Lamellen sorgen ebenfalls für ein hohes Maß an Durchsicht bzw. Lichtlenkung in Raumtiefe.

Hersteller: Retrosolar [26], Glas Wagener [37]

Ebenfalls für den Innenbereich gibt es verspiegelte Lamellen mit Prismenstruktur, die direkt einfallende Sonnenstrahlung reflektiert, gleichzeitig aber eine gute Durchsicht sicherstellt.



Abbildung 2-23: Innenliegende Verschattung (Quelle: [26])

2.3.3 Systeme mit Elementen zur Wärmespeicherung

Am Markt wird derzeit ein Verglasungsprodukt angeboten, das im Scheibenzwischenraum eine PCM-Platte enthält, um einerseits einfallende Solarstrahlung speichern zu können aber auch überschüssige Raumwärme [31].

Das PCM (Phase Change Material) wird in Form eines Salzhydrates verwendet. Die Wärmespeicherung erfolgt durch Aufschmelzen des PCM, beim Abkühlen wird die gespeicherte Wärme wieder abgegeben. Der Phasenübergang erfolgt bei $26\text{ °C} - 28\text{ °C}$. Die Lichtdurchlässigkeit der PCM-Elemente erhöht sich während des Aufschmelzens, der "Ladezustand" des Elements ist somit sichtbar.

Der Hersteller GLASSX bewirbt sein Produkt besonders für Häuser in Leichtbauweise bzw. Häuser mit großem Glasanteil, die aufgrund fehlender thermischer Massen eher zu Überhitzungsproblemen neigen. Mit dem PCM-Element soll die fehlende thermische Speicherkapazität kompensiert werden.

Je nach Bauweise und Orientierung der Fassade kann die PCM Schicht einzeln verbaut, in einen Isolierglasverbund integriert oder mit einem Sonnenschutz (hier ausgeführt als Prismenscheibe, s. a. Abbildung 2-15, kombiniert werden.

Der Wärmedurchgangskoeffizient für das Gesamtelement mit Dreifachverglasung, Prismenscheibe als Sonnenschutz und PCM-Element zur Wärmespeicherung (Abbildung 2-15) wird mit $0,5\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angegeben, die Speicherkapazität des PCM-Elements mit $1185\text{ Wh}/\text{m}^2$.



Abbildung 2-24: Verglasung mit PCM von GLASSX [31]

2.4 Fenster mit Elementen der TGA

2.4.1 Motorische Lüftungsklappen und Lüftungsfenster

Es besteht die Möglichkeit, Fenster mit mechatronischen Beschlägen zu versehen und damit die Öffnung der Fenster zu automatisieren.

Es lässt sich sowohl eine automatisierte Nachtauskühlung als auch bedarfsorientierte, sensorgesteuerte Lüftung realisieren. Der Einsatz eines solchen Fensters kann eine Alternative zur ventilatorgestützten Lüftung darstellen oder auch als Ergänzung zur ventilatorgestützten Lüftung dienen.



Abbildung 2-25: links, Mitte: Lüftungsklappe WICLINE® von Wicona [38], rechts: Lüftungsflügel AWS VV von Schüco [39]

Am Markt werden unterschiedliche Systeme angeboten, z. B. von WICONA [38] oder Schüco [39].

Bei den Lüftungsklappen WICLINE® von WICONA ist der kettenlose Antrieb vollständig verdeckt im Flügel integriert, der Flügel öffnet sich automatisch bis zur einstellbaren Endposition (max. 90°). Vorteil gegenüber anderen Antrieben ist die kettenlose Bewegung des Öffnungsflügels. Der elektrische Anschluss erfolgt über einen verdeckt im Profil montierten Kabelübergang.

Grundsätzlich kann jedes Fenster mit einem automatischen Fensterantrieb versehen werden. Zu unterscheiden ist zwischen Ketten- und Spindelantrieben.



Abbildung 2-26: Kettenantrieb (links) und Spindeltrieb (rechts) für Fenster [40]

Hersteller solcher Antriebe sind z. B. Geze [40] und Windowmaster [41]

2.4.2 Fenster mit Lüftungsfunktion

Insbesondere in Ballungsräumen treten nicht selten hohe Konzentrationen an Feinstäuben und Partikeln auf. Das Öffnen von Fenstern kann hier unter Umständen zu gesundheitlichen Belastungen führen. Sofern eine kontrollierte Be- und Entlüftung über zentrale oder dezentrale Geräte nicht projiziert werden soll, bieten hier Fenster mit integrierten Lüfter-Filter-Kombinationen eine Alternative, s. a. Abbildung 2-27.



Abbildung 2-27: VentoLife von Schüco [39] für gefilterte Luft

Eine sensorgesteuerte Klappe dosiert Außenluft nach Bedarf hinzu, um jederzeit eine optimale Luftqualität im Gebäude zu gewährleisten.

2.4.3 Fensterfalz- und Fensterlüfter

Sog. Fenster- bzw. Fensterfalzlüfter sind selbstregulierende Lüftungsklappen, die eigenständig auf Winddruckänderungen reagieren. In Kombination mit Abluftanlagen ermöglichen sie einen kontrollierten Luftwechsel ohne Zugscheinungen. Es gibt eine Vielzahl von Produkten am Markt; z. B. von [39], [42], [43].



Abbildung 2-28: Typische Fensterfalzlüfter (links, Mitte: [39], rechts [42])

Vergleichsweise neu auf dem Markt ist das Fenster "CLIMAWIN" [44]. Hierbei handelt es sich um ein Verbundfenster mit im Scheibenraum integrierter Jalousie, welches bei Bedarf die gewöhnlich durch das Fenster entweichende Wärme zur Vorwärmung der in den Raum einströmenden Frischluft nutzt.

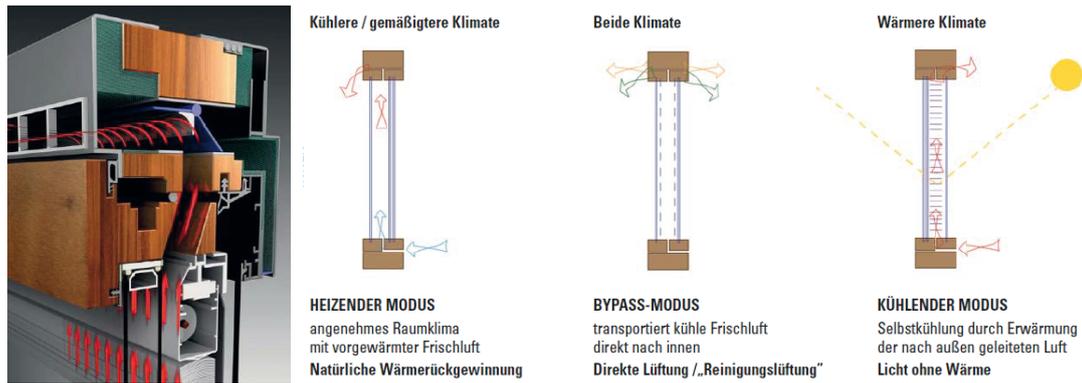


Abbildung 2-29: Climawin [44]

Je nach Stellung des elektronisch gesteuerten Ventils kann die Frischluft wahlweise vorgewärmt werden oder aber direkt in den Raum eingeblasen werden. Die Steuerung des Ventils übernehmen Raum- und Bereichssensoren (CO₂-Sensor, Temperatur und Feuchtigkeit). Das System ist autark vom Gebäudestromnetz, da der Strom von im Fenster installierten Photovoltaikzellen erzeugt wird.

2.4.4 Fenstersysteme mit Lüftungsgerät zur Wärmerückgewinnung

Der Markt bietet mittlerweile eine Vielzahl von im Fenster integrierten Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung an. Die meisten der Geräte sind insbesondere für die Sanierung geeignet, im Folgenden werden einige der Geräte kurz skizziert.

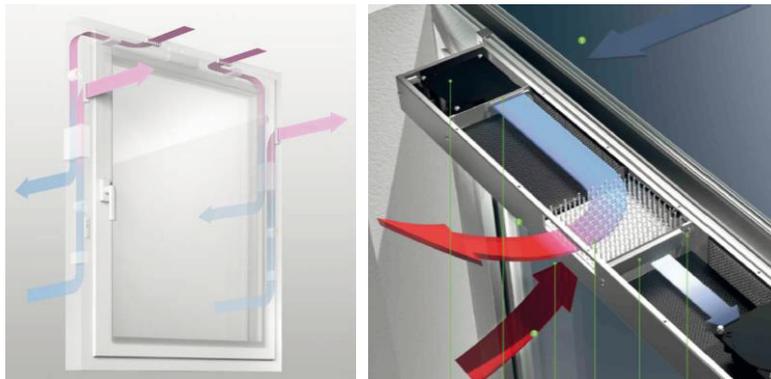


Abbildung 2-30: links: Geneo Inovent von Rehau [45], rechts: VentoTherm von Schüco [39]

Das System Geneo Inovent von Rehau ist in vier Stufen über einen Schalter am Fenster schaltbar. Der maximale Volumenstrom beträgt 30 m³/h, der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung liegt bei 60 %. Das Gerät VentoTherm von Schüco kann den gleichen Volumenstrom fördern, aber bei weniger guter Wärmerückgewinnung ($\eta_{WRG} = 45\%$).

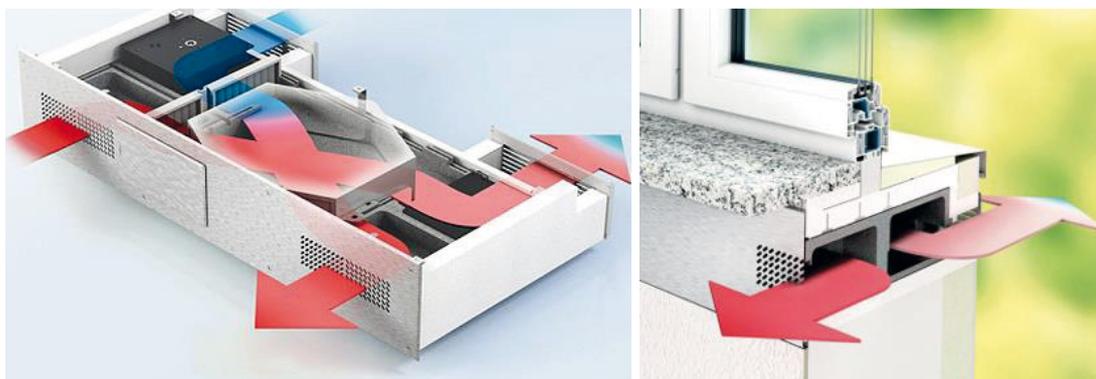


Abbildung 2-31: Fensterintegrierte Lüftung mit Wärme- und Feuchterückgewinnung von Profine [46]

Profine bietet mit Premivent eine fensterintegrierte Lüftung mit Feuchte- und Wärmerückgewinnung (Enthalpie-Tauscher) an. Es können bis zu 82 % der Wärme und bis zu 70 % der Feuchte zurückgewonnen werden. Die Wärme- und Feuchterückgewinnung erfolgt über einen Wärmeübertrager, der aus einer selektiven, antimikrobiellen Polymer-Membran-Folie besteht. Der maximale Volumenstrom beträgt bis zu 50 m³/h.



Abbildung 2-32: links: AeroTherm-Lüfter von Weru [47], rechts: fensterintegrierte Lüftung Endura® Twist von Renson [42].

Die beiden in Abbildung 2-32 dargestellten Fensterlüftungssysteme arbeiten mit einem Wärmerückgewinnungssystem, das wechselseitig durchströmt wird, vergleichbar zu einem Rotationswärmetauscher.

Beim AeroTherm-Lüfter von Weru wird zunächst der keramische Speicher von warmer, abzuführenden Raumluft durchströmt. Anschließend wird die Strömungsrichtung geändert, kalte Luft von außen wird dem Raum zugeführt und nimmt die im Speicher gespeicherte Wärme auf. Der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung liegt bei ca. 90 %, der maximale Volumenstrom liegt bei 15 m³/h.

Vergleichbar dazu arbeitet auch das System Endura Twist von Renson. Hier können Volumenströme bis max. 30 m³/h gefördert werden, der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung liegt bei 80 %.

2.4.5 Fassadensysteme mit Lüftungsgerät zur Wärmerückgewinnung

Eine Erweiterung der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Systeme stellen in die Fassade / Brüstung integrierte Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung dar. Mit Hilfe dieser Geräte sind in der Regel deutlich höhere Luftleistungen realisierbar als bei den fensterintegrierten Systemen. Die Geräte sind vor allem für den Einbau im Nicht-Wohnungsbau konzipiert.



Abbildung 2-33: Fassadenintegriertes Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung (VentoTec) von Schüco [39]

2.5 Multifunktionale Fassadensysteme

2016 wurde an der TU-München von P. Molter die Dissertation "Technikintegration in offenen Fassadensystemen - Entwicklung eines mehrfachfunktionalen Fassadenmoduls mit dem Schwerpunkt der exemplarischen Bewertung eines Bausteins im ganzheitlichen Kontext" [48] fertiggestellt. Hier werden u. a. die multifunktionalen Fassadensysteme von *Schüco*, *Wicona*, und *Kawneer* zitiert, auf die ersten beiden wird im Folgenden u. a. näher eingegangen, Schwerpunkt der Promotionsarbeit selbst liegt aber bei der Integration solarthermischer Komponenten in die Fassade.

2.5.1 VEKA Kastenfenster

Unter der Bezeichnung "Multibox" plant der Fensterprofilhersteller VEKA [49] ein Kastenfenster auf den Markt bringen. Bei dem Kastenfenster sind an einem 17 cm breiten Blendrahmen zwei Flügelebenen angebracht. Der Zwischenraum bietet Raum zur Integration anlagentechnischer Komponenten. Die Bedienung der beiden Fensterflügel kann über Standard-Beschläge erfolgen; optional lässt sich das Fenster auch in ein Gebäudemanagement-System integrieren.

Das Kasten-Fenster erreicht bei Verwendung hochwertiger Verglasungen einen U_w -Wert von bis zu $0,48 \text{ W/m}^2\text{K}$ und sehr guten Schallschutz. Während der wärmeren Sommermonate können Verschattungssysteme - wie etwa automatische Rollos, innenliegende Raffstores oder Plissees zwischen den Flügeln - ein übermäßiges Aufheizen der Räume mindern.

Ein erstes Referenzgebäude wurde in Dortmund realisiert. Alle Fenster sind komplett in die Hausautomation integriert und funktionieren vollautomatisch. Zur Sicherstellung eines optimalen Raumklimas werden die Innentemperatur, der CO_2 -Gehalt sowie die Luftfeuchtigkeit kontinuierlich überwacht. Die Gebäudesteuerung sorgt dafür, dass die Fenster geöffnet oder geschlossen, dass Sonnenschutzlamellen aktiviert und optimal ausgerichtet werden (s. a. [50]).



Abbildung 34: Veka Kastenfenster, links: Querschnitt durch Kastenfenster, Mitte: Zwischenraum Kastenfenster, rechts: Referenzgebäude Dortmund (s. a. [50])

2.5.2 E²-Fassade (Schüco)

Die E² - Fassade der Firma Schüco ist ein modulares Gesamtsystem, das aus den folgenden vier Funktionsmodulen besteht

- Öffnungselemente bzw. Fenster
- Sonnenschutz
- Dezentrale Gebäudetechnik
- Dezentrale Stromerzeugung (PV-Module)

Das Fassadenmodul selbst besteht aus einem geschosshohen Bauteil. Es können Öffnungselemente mit großen Lüftungsquerschnitten realisiert werden. Die Fenster können als Senkklipp- oder Parallel-Ausstell-Fenster ausgeführt werden, sie können elektrisch bedienbar werden und lassen die natürliche Lüftung zu. Der Systemantrieb lässt sich in die Gebäudetechnik einbinden und zentral bzw. dezentral ansteuern.

Der außenliegende Sonnenschutz (s. a. Abbildung 2-35) besteht aus Mikro-Lamellen. Sie bieten Sonnen- und Blendschutz mit einer kompletten Abschattung ab einer Sonnenhöhe von 20°. In eingefahrenem Zustand liegt der Sonnenschutz nicht sichtbar, fassadenintegriert im opaken Bereich vor der Geschosstrenndecke und sorgt für eine flächenbündige Optik der Fassade. Der Sonnenschutzbehang besitzt eine erhöhte Lamellenstabilität, so dass ein Ausfahren auch bei hohen Windgeschwindigkeiten bis 30 m/s möglich ist.



Abbildung 2-35: E² - Fassade von Schüco - Sonnenschutz, Fotos aus [51]

Die dezentrale Lüftungsanlage ist auf der Höhe der Geschossdecken verdeckt in der Fassade integriert. Die Luftein- bzw. -auslässe können wahlweise im Boden- und/oder im Deckenbereich angeordnet werden, so dass grundsätzlich eine geschosshohe, verglaste Fassade realisiert werden kann. Das Lüftungsgerät ist mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet, zusätzlich besteht die Möglichkeit die Zuluft nachzuheizen bzw. zu kühlen.

Die Frischluft wird über Bodengeräte quellluftartig eingebracht, Deckengeräte dienen der Abführung der Abluft, s. a. Abbildung 2-36. Das System kann durch öffnbare Fenster ergänzt werden.



Abbildung 2-36: Zu- und Abluftführung der dezentralen Lüftungsgeräte der E²-Fassade, Bilder aus [51]

Die E²-Fassade wurde im Projekt "Interface - Entwicklung von multifunktionalen Elementfassaden zur energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden" im Jahr 2009 an der TU Braunschweig im Rahmen der Forschungsinitiative "Zukunft Bau" ausführlich untersucht [52]. Die Ergebnisse des Projektes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur gewünschten Raumtemperaturen werden für den Sommer- und Winterfall durch den Einsatz dezentraler Technik unter Laborbedingungen überwiegend gut eingehalten.
- Durch die Raumkonditionierung mit dezentralen Lüftungsgeräten kann eine gute Behaglichkeit am Arbeitsplatz erreicht werden.
- Die Komfortkriterien nach DIN EN ISO 7730 (Kategorie A bzw. B) werden hinsichtlich Temperatur, Raumluftfeuchte und Geschwindigkeit eingehalten.
- Der Luftvolumenstrom kann individuell durch das Einstellen entsprechender Leistungsstufen auf den Nutzerbedarf angepasst werden.
- Dezentrale Lüftungsgeräte lassen sich ohne großen Aufwand präsenzabhängig regeln. Die Folge ist das Erzielen von deutlichen Energieeinsparungen im Betrieb.

Grundsätzlich kommen die Autoren zum Schluss, dass sich durch das hohe Maß an Vorfertigung die dezentrale Elementfassade mit integrierter Technik besonders für die Sanierung geeignet ist.

Aufgrund vielfältiger Schwierigkeiten – insbesondere bei der Ausführung von gewerkeübergreifenden Leistungen im Bereich Fassadenbau bzw. Heizung, Lüftung, Sanitär – konnte sich die E²-Fassade nicht am Markt etablieren (s. dazu auch Abschnitt 7).

2.5.3 TEmotion (Wicona)

TEmotion ist ein von WICONA entwickeltes Fassadenkonzept mit integrierter aktiver und autarker Gebäudetechnik [53], [54]. TEmotion steuert die integrierte Lüftungs-, Klima- und Heizungstechnik, passt den Sonnenschutz den jeweiligen Gegebenheiten an und verhindert die Überhitzung des Innenraums. Zugleich sorgt sie per adaptiver Lichtlenkung für blendfreies, indirekt wirkendes Tageslicht. Durch das automatische Öffnen von Fassadenelementen lässt sich das Gebäude nachts mit Frischluft spülen, was die Kühllast erheblich reduziert. Die aktive Solarnutzung ist durch Integration von Photovoltaik-Elemente möglich.

Die einzelnen Fassadenelemente können individuell zusammengestellt und elementweise montiert werden.



Abbildung 2-37: TEmotion von Wicona [54]

Die TEmotion-Fassade wurde in einem von der Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekt weiterentwickelt und in einem sanierungsbedürftigen Schulgebäude exemplarisch eingesetzt [55].

2.5.4 Zwei-Grad-Fassade

Das Zwei-Grad-Konzept von Schüco zeichnet sich durch bewegliche Layer an der Fassade aus: Je nach Bedarf können die mobilen Funktionslayer – Glas-, Dämm-, Sonnenschutz- oder Dünnschicht- Photovoltaiklayer – vollautomatisch über eine Steuerung oder manuell aus dem opaken Bereich vor die transparenten Elemente geschoben werden. Maximal drei Schienen können variabel belegt werden. Auf diese Weise können die Fassaden eigenständig auf unterschiedliche Jahres- und Tageszeiten und die damit verbundenen äußeren Gegebenheiten reagieren und sich anpassen.

Die Zwei-Grad-Fassade wurde 2010 der Öffentlichkeit vorgestellt. Es gibt zwei Referenzprojekte, eins davon wurde mehrfach in Architektur- und Fachzeitschriften vorgestellt (z. B. in [56], [57] bzw. [58]). Zudem wurde es auf der Fachmesse "Bau" 2011 in München im Kundenmagazin vorgestellt [59].

Allerdings scheint es bei diesen Pilotprojekten geblieben zu sein. Auf den Internetseiten der Firma Schüco finden sich derzeit keine Hinweise zum System.



Abbildung 2-38: Zwei-Grad-Fassade von Schüco, Fotos aus [58]

2.5.5 Closed cavity Fassade

Eine sog. "Closed-Cavity-Fassade" ist eine zweischalige Fassade mit einem komplett geschlossenen Zwischenraum (s. a. [60], [61]). In die „geschlossene Kammer“ wird mit leichtem Überdruck getrocknete und gereinigte Luft eingeblasen, die verhindert, dass sich auf den Fensterscheiben Kondensat oder Schmutz ablagern.

In Abbildung 2-39 ist ein ausgeführtes Beispiel einer solchen Fassade dargestellt.



Abbildung 2-39: Closed cavity Fassade, Bilder aus [62]

“Closed-Cavity-Fassaden“ werden von den Firmen Josef Gartner [60] und Wicona [63] am Markt angeboten.

2.6 Fassadensysteme mit Elementen zur Wärmespeicherung – Transparente Wärmedämmung (kurz: TWD)

Transparente Wärmedämmung bezeichnet Materialien die eine gute Wärmedämmung mit einer hohen Lichtdurchlässigkeit verbinden. Dies können Waben- bzw. Kapillarstrukturen, Hohlkammerstrukturen oder Aerogele sein.

Im Vergleich zu einer normalen, außen aufgetragenen und opaken Wärmedämmung wird bei der TWD die Sonneneinstrahlung durch das Dämmmaterial hindurchgelassen. An der tragenden Wand wird die Sonne absorbiert und in Wärme umgewandelt. Da die TWD als Wärmedämmung funktioniert, wird die Wärmeabgabe nach außen stark behindert, ein Großteil der Sonnenenergie wird zeitverzögert (ca. 3 – 6 h) als Wärme in den Raum hinter der TWD-Wand geleitet. Eine ausführliche Darstellungen zur transparenten Wärmedämmung gibt z. B. [64].

TWD-Systeme können ggf. dann einen sinnvollen Beitrag zur Deckung des Heizenergiebedarfs leisten, wenn während der Heizperiode vergleichsweise viele kalte, aber strahlungsreiche Tage auftreten. Zu beachten ist allerdings, dass der U-Wert einer TWD-Fassade um den Faktor 2 – 3 schlechter ist als der U-Wert einer durchschnittlich gut gedämmten Fassade mit opakem Dämmstoff. D. h., dass an Tagen mit schlechter oder gar keiner Einstrahlung, an denen keine zeitversetzten Gewinne möglich sind, ganz normal geheizt werden muss. Die Transmissionsverluste sind in diesem Fall im Vergleich zu einem Gebäude mit konventioneller Dämmung deutlich höher.

Zu Zeiten, in denen kein Solareintrag gewünscht wird (Sommer), muss die TWD verschattet werden.



Abbildung 2-40: links: Funktionsskizze Transparente Wärmedämmung [65]; rechts: Gebäude mit transparenter Wärmedämmung [66]

Zu beachten ist, dass Hersteller von TWD-Systemen z. T. unrealistisch niedrige Heizenergiebedarfswerte suggerieren und bei der Berechnung der U-Werte der TWD-Fassade die solare Einstrahlung verrechnen.

2.7 Systeme aus Forschung und Entwicklung

2.7.1 Verglasungen

Über die in Kapitel 2.1 genannten Möglichkeiten intelligenter Verglasungen hinaus, wird in diesem Bereich weiterhin Forschung und Entwicklung betrieben mit dem Ziel, die Verglasung bzw. deren Eigenschaften an sich ändernde Randbedingungen anzupassen.

2.7.1.1 Mit Wasserstoff schaltbare Spiegel (HYSWIM)

Eine Metalllegierung zwischen der Verglasung reagiert auf Zufuhr von Wasserstoffgas und kann so vom verspiegelnden Zustand (Licht reflektierend) über ein schwarz-mattes Aussehen (Licht absorbierend) bis zur Lichtdurchlässigkeit geschaltet werden [67], siehe Abbildung 2-41 a - c.

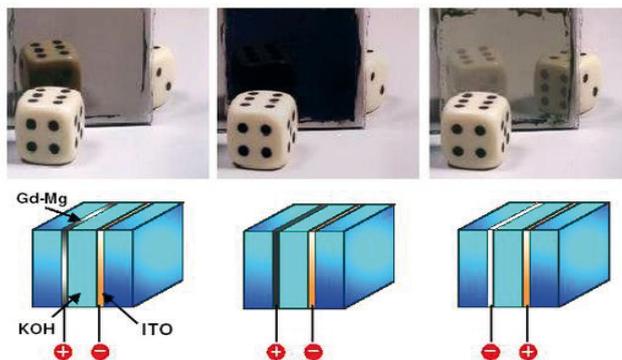


Abbildung 2-41: Schaltzustände eines mit Wasserstoff schaltbaren Spiegels [67]

2.7.1.2 Schaltbare Mikrospiegelmodule

Im Scheibenzwischenraum der Verglasung befindliche Mikrospiegel können über eine sehr geringe Spannungszufuhr ihre Krümmung ändern und so eine gezielte Lichtlenkung vornehmen. Der einzelne Spiegel ist aufgrund seiner Größe im Nanobereich für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar [68].

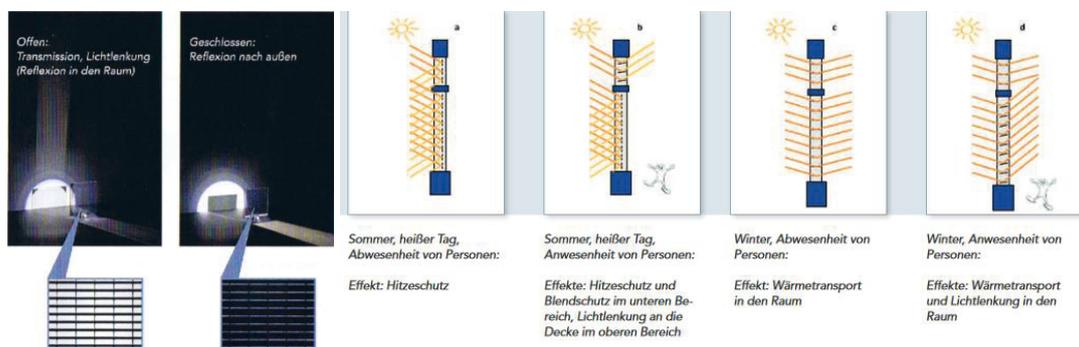


Abbildung 2-42: Schaltzustände der Mikrospiegel [68]

2.7.1.3 Mikrostrukturierte Verglasung

Mikrospiegel aus Aluminium werden zur optimierten Lichtlenkung in der Verglasung bzw. in einer Harzschicht fest eingebettet. Das Prinzip funktioniert vergleichbar zu den in Kapitel 2.2.2 bzw. 2.3.2 dargestellten Tageslichtlenksysteme, jedoch mit der Lage der lichtlenkenden Spiegel direkt in bzw. auf der Verglasung und in einer wesentlich geringeren Größe [69].

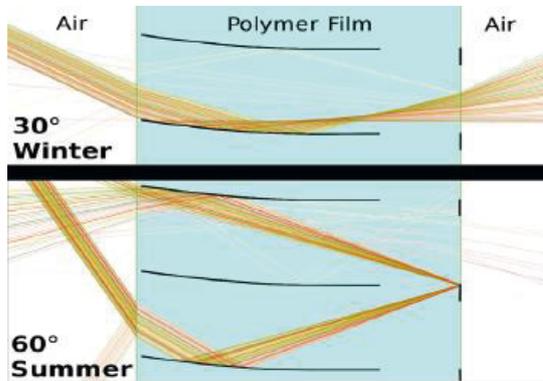


Abbildung 2-43: Simulation des Strahlengangs durch die 3D-Mikrospiegel für den Winter- und Sommerfall [69]

2.7.1.4 Electric Tunable Windows

Dieses System, das an der Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences erforscht wird, dient vornehmlich dem Sichtschutz. Durch eine elektrische Spannungszufuhr über Nano-Silberdrähte wird eine Oberflächen deformation eines auf der Verglasung angebrachten Elastomers bewirkt, was zu einer Trübung des Glases führt [70].

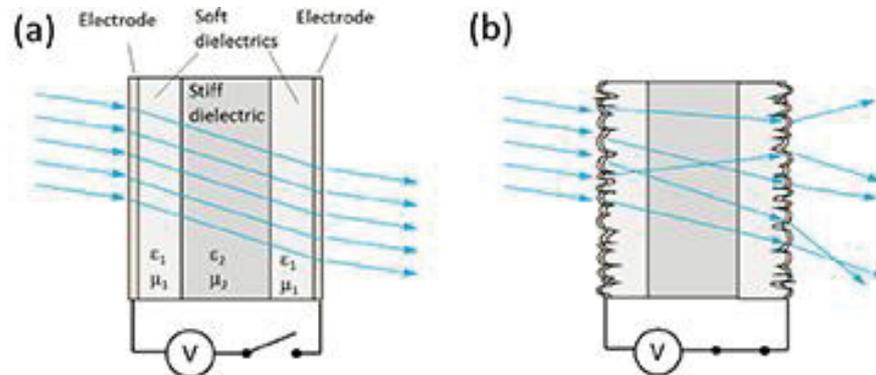


Abbildung 2-44: Electric Tunable Windows [71]

2.7.2 Fassadensysteme

Im Bereich der Fassadengestaltung und -anpassung wird auch disziplinübergreifend geforscht. Hier beschäftigt man sich vor allem mit regelbaren Öffnungen für die Steuerung des Lichteinfalls oder des Luftaustausches sowie mit Wärmespeicherung und Wärmegewinnung über die Fassade. Die Anwendung im Baubereich ist hier größtenteils nicht absehbar.

2.7.2.1 Energieklinker

An der Fachhochschule Münster wurde in Zusammenarbeit mit einem Ziegelhersteller ein Klinkerstein entwickelt, der ähnlich wie eine thermische Solaranlage die Erwärmung des Mauerwerks nutzt und die Wärme über ein Rohrsystem z. B. an eine Wärmepumpe weiterleitet [72].



Abbildung 2-45: links: Energieklinker mit Nut, rechts: Querschnitt mit eingelegten Rohren

2.7.2.2 Schaltbare Wärmedämmung (SWD)

Das Funktionsprinzip schaltbarer Wärmedämmung basiert wie schaltbare Verglasung darauf, die Lichtdurchlässigkeit zu regeln. Dies wird wie bei transparenter Wärmedämmung genutzt, um die Erwärmung des hinter der TWD liegenden Bauteils zu erwirken (Wärmeleitbetrieb), aber in verdunkeltem Zustand zu unterbinden (Dämmbetrieb), siehe Abbildung 2-46.

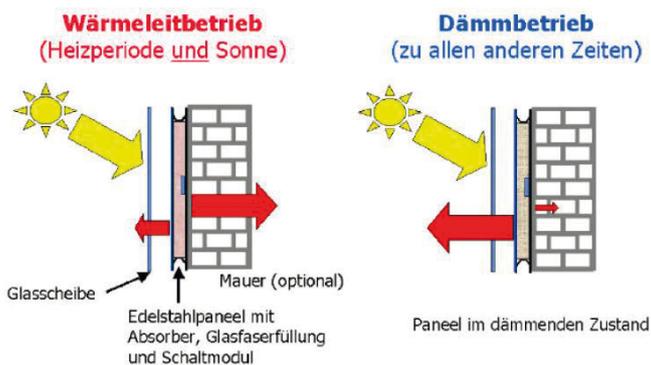


Abbildung 2-46: Schematische Darstellung des Prinzips schaltbarer Wärmedämmung [73]

Es gibt unterschiedliche Mechanismen, die Wärmeleitung der Dämmung zu „schalten“. In [73] werden Getter-basierter SWD (Abbildung 2-46) und Heat-Pipe basierter SWD untersucht.

2.7.2.3 *BioSkin Fassade*

Bei der Sony Osaki Zentrale in Tokio wurden an der Fassade Keramikröhren angebracht, durch die das auf dem Gebäude anfallende und gesammelte Regenwasser geleitet wird und durch die Struktur der Röhren verdunstet. Hierbei wird die Umgebungsluft der Fassade um ca. 2° gekühlt [74].



Abbildung 2-47: Sony Osaki Zentrale in Tokio, Gebäudeansicht und Fassadenausschnitt [74]

2.7.2.4 *Flüssige Gebäudehülle*

Ein Forschungsvorhaben der Friedrich-Schiller-Universität Jena beschäftigt sich ebenfalls mit Möglichkeiten der Kühlung von Gebäuden über Flüssigkeitstransport in der Außenfassade. Hier wird jedoch die Flüssigkeit wie in einem thermischen Kollektor, innerhalb von Glasmodulen geführt. Das System kann auch als Wärmespeicher und zum Betrieb einer Wärmepumpe dienen [75].

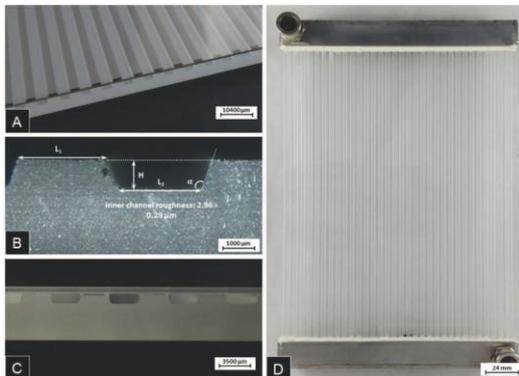


Abbildung 2-48: Glasmodul mit Flüssigkeitskanälen, A) Ansicht, B) Querschnitt durch einen Kanal, C) Querschnitt durch das Glasmodul mit Kanälen, D) Versuchsmodul mit Ein- und Auslass für die Flüssigkeit [75]

2.7.2.5 *Bio-Reaktorfassade*

Eine alternative Form der Nutzung von Sonnenenergie bietet die Bioreaktorfassade "Solarleaf" der Fa. Colt [76]. Hierbei wird in Fassadenelementen mit Nährflüssigkeit durch Mikroalgen das in der eingeblasenen Luft vorhandene CO₂ durch Photosynthese "abgebaut". Es entsteht Wärme und die sich vermehrenden Algen werden als Biomasse "geerntet". Die Bioreaktorfassade wurde in einem Demonstrationsprojekt am BIQ-Haus in Hamburg umgesetzt, siehe auch Abbildung 2-49.



Abbildung 2-49: BIQ-Haus in Hamburg mit Bio-Reaktorfassade (rechts) und Fassadenelement (links) [76]

Die Fassadenelemente dienen hier als Sekundärfassade. Die Bioreaktorfassade kann als hinterlüftete Fassade oder als Doppelfassade ausgebildet werden und ihre Elemente auch drehbar, der Sonnenstand nachführbar ausgeführt werden.

2.7.3 Elemente mit Formgedächtnis-Effekt

Es gibt eine Reihe von Systemen in der Forschung und Entwicklung, aber auch in der Anwendung, die sich den sog. Formgedächtnis-Effekt zu Nutze machen. Formgedächtnislegierungen sind spezielle Metalle, die in Abhängigkeit der Temperatur in zwei unterschiedlichen Kristallstrukturen existieren können.

Formgedächtnismaterialien weisen im Ausgangszustand eine gewollte "Verformung" auf, bei Temperaturänderungen "erinnern" sie sich an ihren Ursprungszustand und nehmen diesen wieder an. Die im Folgenden vorgestellten Systeme nutzen diesen Effekt, um ein Öffnen bzw. Schließen von Elementen hervorzurufen, was in den meisten Fällen den Lichteinfall steuern soll.

2.7.3.1 Chamäleon-Membran

In Zusammenarbeit von Fraunhofer Institut IWU in Dresden und der Weißensee Kunsthochschule Berlin wurde eine Fassade entwickelt, die ähnlich dem Prinzip des Chamäleons seine Farbe an die Umgebung anpasst. Für die Fassade beinhaltet dies einen Farbwechsel unterschiedlich lichtdurchlässiger Elemente. Diese werden aufgrund der Temperatur oder auch durch elektrische Spannung über Federn mit Formgedächtniseffekt geöffnet bzw. geschlossen (lineare Membran).

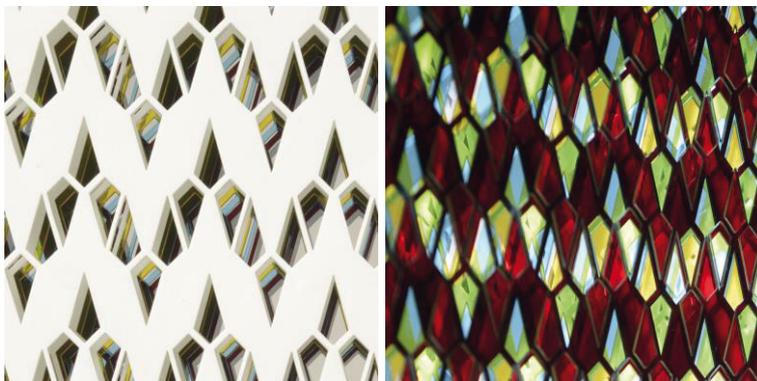


Abbildung 2-50: Lineare Chamäleon-Membran, Ansicht von außen (linkes Bild) und innen (rechtes Bild) [77]

In einer Variante zur o.g. linearen Membran wirkt der Formgedächtnis-Effekt bei der sog. "exzentrischen" Chamäleon-Membran in der Drehachse einer Feder, die die schuppenähnlichen Elemente der Membran gegeneinander verschiebt und so die Öffnungen in den Schuppen vergrößert bzw. verkleinert.



Abbildung 2-51: Exzentrische Chamäleon-Membran, teilweise geöffnet [77]

2.7.3.2 Solar Curtain

Das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU hat in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Textil- und Flächen-Design der Weißensee Kunsthochschule Berlin ein textiles Sonnenschutzsystem entwickelt, bei dem sich das Öffnen bzw. Schließen der Sonnenschirmchen mittels Drähte mit Formgedächtnislegierung vollzieht. [78]



Abbildung 2-52: Solar Curtain [78]

2.7.4 Entwicklungen aus Kunst, Design und anderen Fachgebieten

2.7.4.1 Meteorosensitive Holzelemente

Am Institute for Computational Design and Construction der Universität Stuttgart wurde die Eigenschaft von Holz genutzt, sich aufgrund variierender Luftfeuchtigkeit zu verformen, wie beim Prinzip eines Tannenzapfens. Hierbei öffnen sich kleine Holzlamellen bei sinkender Luftfeuchtigkeit und schließen sich, wenn diese steigt, s. a. Abbildung 2-53.



Abbildung 2-53: Funktionsweise eines Tannenzapfens und der Holzlamellen

Dieser Effekt wurde bei HygroSkope, einem im Centre Pompidou in Paris ausgestellten Kunstwerk, siehe Abbildung 2-54 und HygroSkin, einem Pavillion realisiert.

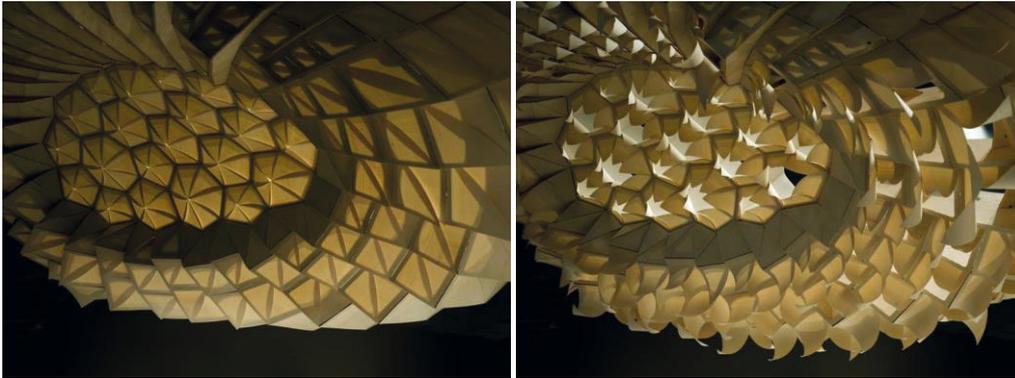


Abbildung 2-54: HygroSkope, Holzlamellen in geschlossenem Zustand (linkes Bild) und geöffnet (rechts)

2.7.4.2 Beschattungstuch

Aus der Landwirtschaft kommt die Entwicklung des Textils OMBRA-DLS®, das durch unterschiedlichen Dehnungszustand seine Lichtdurchlässigkeit variiert [79]. Es wurde für die Anwendung in Gewächshäusern entwickelt, ist aber auch für die Nutzung im Gebäudebereich als variabler Sonnenschutz denkbar.

2.7.4.3 Breathing Skin

In der Fassade der Breathing Skins sind „pneumatische Muskeln“ integriert, die sowohl für einen Luftaustausch im Rauminneren sorgen, als auch als Sicht- bzw. Sonnenschutz dienen [80].

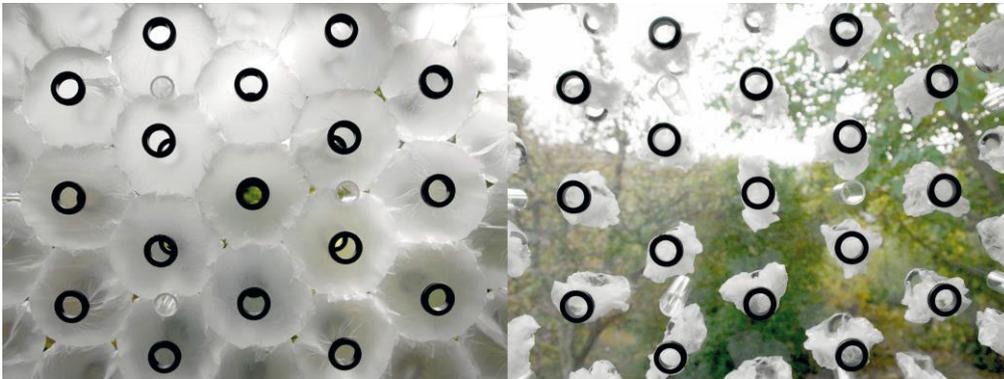


Abbildung 2-55: Breathing Skins, Pneumatische Elemente, links mit Luft gefüllt, rechts in leerem Zustand [80]

2.8 Zusammenfassung der Marktrecherche

Es gibt eine Vielzahl von Komponenten für Sonnenschutz, Blendschutz und Tageslichtlenkung sowie zur technischen Gebäudeausrüstung, die in Fassade oder Fenster integriert werden können. Der vorliegende Abschnitt gibt eine kurze Zusammenfassung der am Markt erhältlichen Produkte.

Seit etlichen Jahren werden intelligente Verglasungen, deren Kennzeichen in der Regel eine schaltbare Schicht ist, für den Einsatz als Verschattungselement oder Sichtschutz entwickelt. Grundsätzlich ist hier zu unterscheiden zwischen

- elektrochromen Schichten, die ihre optischen Eigenschaften durch Anlegen einer Spannung ändern

- gasochromen Schichten, die ihre optischen Eigenschaften durch Zuführen von Wasserstoffgas in den Scheibenzwischenraum ändern
- thermochromen und thermotropen Schichten, die ihre optischen Eigenschaften selbstständig aufgrund von Temperaturänderungen ändern
- elektrotropen Schichten (PDLC-Schichten und SPD-Schichten), die eingebetteten Flüssigkeitskristalle sorgen hier im ungeordneten Zustand für eine starke Lichtstreuung, durch Anlegen einer Spannung wird die Schicht transparent
- photochrome und photoelektrochrome Schichten, die ihre optischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Einstrahlung ändern

Bis auf die gasochrom arbeitenden Schichten sind alle genannten Verglasungen am Markt erhältlich. Für Verschattungen, die regelbar sein sollen, sind grundsätzlich elektrochrome Schichten (z. B. von EControl) oder elektrotrope Schichten auf SPD-Basis (z. B. von Licri-vision) geeignet. Hier kann der g-Wert der Verglasung auf bis zu 10 % reduziert werden. Elektrochrome Verglasungen gewährleisten Sonnenschutz, nicht aber Blendschutz.

Thermochrome und thermotrope Schichten sind ebenfalls am Markt erhältlich, können im Gebäudebereich aber nur sehr begrenzt sinnvoll eingesetzt werden, da der Schaltvorgang in Abhängigkeit einer bestimmten Temperatur erfolgt und damit nicht steuer- und regelbar ist. Das gleiche gilt auch für photochrome und photoelektrochrome Schichten, die ihre optischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Einstrahlung ändern. Elektrotrope Schichten auf PDLC-Basis eignen sich für einen schaltbaren Sichtschutz, nicht aber zur Verschattung.

Im Bereich der Elemente für Sonnenschutz, Blendschutz und Tageslichtlenkung bietet der Markt eine Vielzahl von Möglichkeiten für starre oder bewegliche Elemente vor dem Fenster (d. h. außenliegend) oder im Scheibenzwischenraum. Allerdings gibt es bislang nur sehr wenige Elemente am Markt, die alle Anforderungen hinsichtlich Verschattung, Blendschutz und Tageslichtnutzung gleichzeitig optimal erfüllen.

Bei den Elementen der technischen Gebäudeausrüstung sind vor allem die motorisch betriebenen Lüftungsklappen bzw. Fenster und die unterschiedlichen Lüftungselemente zu nennen. Die unterschiedlichen Lüftungselemente reichen von einfachen Fensterfalzlüftern über im Rahmen integrierte Zuluftventilatoren bis hin zu komplexeren Geräten mit Wärmerückgewinnung, die je nach Produkt im Rahmen, im Sturzbereich, unterhalb der Fensterbank oder im Brüstungsbereich installiert werden. Vor Auswahl eines geeigneten Produktes sollte die Höhe des erforderlichen Tagluft- bzw. Nachtluftwechsels und das Lüftungskonzept exakt festgelegt werden.

Noch einen Schritt weiter gehen die multifunktionalen Fassadenelemente wie z. B. das Kastenfenster von Veka, die E²-Fassade von Schüco bzw. TEmotion von Wicona. Hier werden innerhalb eines kompakten Fassaden- oder Fenstermoduls Verschattungselemente und Elemente zur Lüftung kombiniert. Die Platzierung dieser Module am Markt ist bislang problematisch. Die Fassadenmodule E²-Fassade und TEmotion wurden vor rund 10 Jahren entwickelt, konnten sich am Markt aber nicht behaupten, so dass sie aus dem Programm genommen wurden. Die Kastenfenster von VEKA befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium, detaillierte Erfahrungen aus der Praxis liegen bislang nicht vor.

Mehrfach realisiert wurde dagegen die sog. "Closed-cavity-Fassade", hierbei handelt es sich um eine zweischalige Fassade mit einem komplett geschlossenen Zwischenraum. In die „geschlossene Kammer“ wird mit leichtem Überdruck getrocknete und gereinigte Luft eingblasen, die verhindert, dass sich auf den Fensterscheiben Kondensat oder Schmutz ablagern. Langzeiterfahrungen zu "Closed-cavity-Fassaden" liegen noch nicht vor. Es wird sich in Zukunft zeigen, ob die prognostizierten Einsparungen bei Wartung und Betrieb eintreffen.

Systeme aus Forschung und Entwicklung spielen bislang im Gesamtgeschehen keine Rolle. Hier muss abgewartet werden, welche der vorgestellten Komponenten tatsächlich den Schritt vom experimentellen Stadium zu einem marktreifen Produkt schaffen, das sich auch in Hinblick auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis am Markt behaupten kann.

Bei dieser Vielzahl von Möglichkeiten besteht die Aufgabe der Architekten vor allem darin, den für die Anwendung passenden – am besten idealen – Sonnen- und / oder Blendschutz auszuwählen. Werden folgende Aspekte im Rahmen der Grundlagenermittlung beachtet, so können sie den Weg zur passenden Komponente weisen:

- Ist eine Gebäudeautomation oder Teil-Automation geplant? Mit Hilfe von Komponenten, die über eine Automation angesteuert oder geregelt werden können, lässt sich die Nachweisführung zum sommerlichen Wärmeschutz positiv beeinflussen.
- Wie wird das Gebäude (oder auch der Raum) genutzt? Hieraus leitet sich zum Beispiel die Frage ab, wie wichtig der ungestörte Blickkontakt zwischen innen und außen ist oder ob eine Tageslichtlenkung sinnvoll oder sogar notwendig ist.
- Welche Windlasten treten am geplanten Standort auf?
- Welche Budgets bestehen für Betrieb und Wartung der Sonnenschutzanlagen?

3 Gebäudeautomation

Im Kontext intelligenter Komponenten für die Fassade spielt die Gebäudeautomation eine wichtige Rolle, da intelligente Komponenten in der Regel nur in Kombination mit einer sinnvoll aufgebauten Gebäudeautomation ihre Möglichkeiten voll entfalten können und zu nennenswerten Energieeinsparungen führen bzw. zur Steigerung des Raumkomforts.

Große Einsparpotentiale können durch einen z. B. einstrahlungsabhängig betriebenen Sonnenschutz oder durch die Nutzung natürlicher Nachtlüftung erschlossen werden. Sofern ein Gebäude aktiv gekühlt wird, lassen sich die Einsparungen sowohl energetisch als auch monetär relativ unproblematisch bewerten. Wird ein Gebäude nicht aktiv gekühlt, können die positiven Auswirkungen einer Automatisierung zwar nicht direkt quantifiziert werden, es lassen sich aber die Komfortverbesserungspotentiale z. B. basierend auf DIN EN 15251 gegenüber nicht automatisch bedienten Systemen darstellen.

Im vorliegenden Kapitel wird deshalb zunächst auf die derzeit am Markt verfügbaren Schnittstellen eingegangen. Ziel dabei ist, einen Überblick über die einzelnen Aspekte zu geben, für detaillierte Ausführungen ist entsprechende Fachliteratur erforderlich.

3.1 Überblick über die Ebenen der Gebäudeautomation

Als Gebäudeautomation (GA) bezeichnet man die Gesamtheit von Überwachungs-, Steuer-, Regel- und Optimierungseinrichtungen in Gebäuden. Ziel der Gebäudeautomation ist es, Funktionsabläufe gewerkeübergreifend selbstständig nach vorgegebenen Parametern durchzuführen und deren Bedienung bzw. Überwachung zu vereinfachen. Alle Sensoren, Aktoren, Bedienelemente, Verbraucher und andere technische Einheiten werden miteinander vernetzt. Merkmal ist die dezentrale Anordnung von Steuerungseinheiten (DDC – Gebäudeautomation) sowie die durchgängige Vernetzung mittels eines Kommunikationsnetzwerkes oder Bussystems.

Grundsätzlich wird die Gebäudeautomation (funktional) in drei Ebenen unterteilt: die **Feldebene**, die **Automationsebene** und die **Managementebene**, Abbildung 3-1 zeigt die klassische Aufteilung der Ebenen. Infolge der rasanten Entwicklung der Mikroprozessoren in den letzten Jahren wird allerdings diese Aufteilung immer mehr verwischt. Sensoren und Aktoren werden immer intelligenter, so dass diese inzwischen auch direkt an die Feldbusse der DDCs angebunden werden. Zudem wandert durch den Einsatz von sogenannten *Residential Gateways* auch mehr lokale Intelligenz in die Automationsebene, in der Managementebene ist teilweise zwischen lokalem und Remote Management zu unterscheiden.

Managementebene

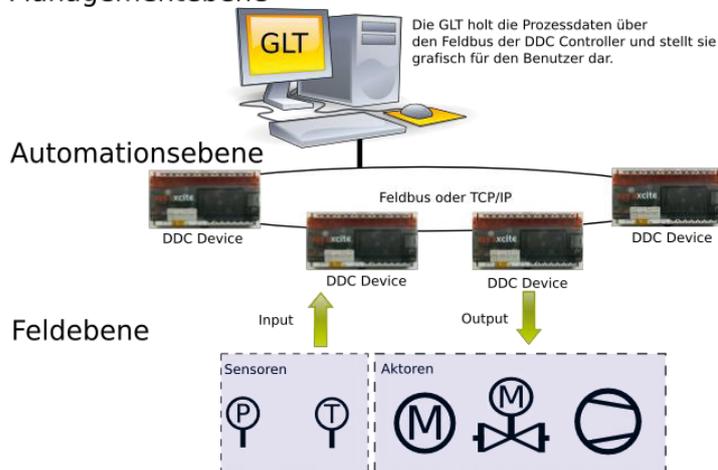


Abbildung 3-1: Ebenen der Kommunikation in der Gebäudeautomation [81]

3.1.1.1 **Managementebene**

Als **Managementebene** wird die Ebene bezeichnet, mit deren Hilfe die Anlagen überwacht und in ihrer Betriebsweise optimiert werden. Die Visualisierung historisierter und statistisch bearbeiteter Daten gehört dazu. In der Managementebene kommt spezielle Software, die Gebäudeleittechnik zum Einsatz. Als herstellerunabhängige Schnittstellen auf der Managementebene sind OPC und BACnet zu nennen, wobei BACnet auch auf Automationsebene (native BACnet) funktioniert.

3.1.1.2 **Automationsebene**

Für den Austausch von Daten auf der **Automationsebene** zwischen den DDCs sind trotz Standardisierung auch heute noch vielfach proprietäre¹ Bussysteme im Einsatz.

Auf Automationsebene sind insbesondere BACnet, LON (Local Operating Network) und KNX-Systeme als herstellerübergreifende Bussysteme zu nennen. BACnet und LON werden von großen Unternehmen bevorzugt im Zweckbau eingesetzt. Basierend auf leistungsstarken Steuercontrollern im Schaltschrank etablieren sich in den letzten Jahren OSGi-basierte Gebäudebetriebssysteme ähnlich den SPS-Systemen, jedoch ist hier keine Programmierung mehr notwendig. Alle Funktionalität wird über eine Managementsoftware zusammengestellt.

3.1.1.3 **Feldebene**

Als **Feldebene** wird die Verkabelung der Sensoren und Aktoren mit den DDC-GA-Komponenten² bezeichnet. Die Schnittstellen zu den Sensoren sind sehr einfach, da die Sensoren in der Regel direkt mit den Eingängen der DDC verbunden werden. Dabei wertet die DDC-GA-Komponente bei Temperatursensoren, z. B. Pt100, NTC oder PTC, die Widerstandsänderungen aus, die den Messwert repräsentieren. Bei aktiven Sensoren, z. B. Drucksensoren, wird ein analoges Einheitssignal von 0/4 bis 20 mA oder 0 bis 10 V übertragen, das den Messwert repräsentiert. Bei den digitalen Eingängen wird mit potentialfreien Kontakten und S0-Schnittstellen gearbeitet.

3.2 **Gebäudeautomation – Protokolle und Systeme**

3.2.1 **Kommunikationsprotokolle**

In der Informatik und in der Telekommunikation ist ein Kommunikationsprotokoll eine Vereinbarung, nach der die Datenübertragung zwischen zwei oder mehreren Parteien abläuft. In seiner einfachsten Form kann ein Protokoll definiert werden als eine Menge von Regeln, die Syntax, Semantik und Synchronisation der Kommunikation bestimmen. Protokolle können durch Hardware, Software oder eine Kombination von beiden implementiert werden. Handelt es sich um die Kommunikation in einem Rechnernetz, so spricht man von einem Netzwerkprotokoll.

Protokolle unterscheiden sich stark in Zweck und Komplexität. Die meisten Protokolle legen eine oder mehrere der folgenden Vorgehensweisen fest:

¹ **Proprietäre Software** bezeichnet eine Software, die das Recht und die Möglichkeiten der Wieder- und Weiterverwendung sowie Änderung und Anpassung durch Nutzer und Dritte stark einschränkt. (Wikipedia)

² Eine Komponente der **Direct-Digital-Control-Gebäudeautomation**, kurz **DDC-GA**, ist eine einem Computer ähnliche elektronische Baugruppe, die für Steuerungs- und Regelungsaufgaben in der Gebäudeautomatisierung eingesetzt wird. (Wikipedia)

- Feststellen der zugrundeliegenden physikalischen Verbindung (z. B. LAN oder WLAN) oder der Existenz des anderen Endpunkts der Verbindung
- Datenflusskontrolle (Handshaking)
- Vereinbarung der verschiedenen Verbindungscharakteristiken
- Wie eine Botschaft beginnt und endet und wie eine Botschaft formatiert ist
- Was mit beschädigten oder falsch formatierten Botschaften getan wird (Fehlerkorrekturverfahren)
- Wie unerwarteter Verlust der Verbindung festgestellt wird und was dann zu geschehen hat
- Beendigung der Verbindung

3.2.2 Ethernet

Ethernet ist eine Technologie, die Software (Protokolle usw.) und Hardware (Kabel, Verteiler, Netzwerkkarten usw.) für kabelgebundene Datennetze spezifiziert, welche ursprünglich für lokale Datennetze (LANs) gedacht war und daher auch als LAN-Technik bezeichnet wird. Sie ermöglicht den Datenaustausch in Form von Datenframes zwischen den in einem lokalen Netz (LAN) angeschlossenen Geräten (Computer, Drucker und dergleichen).

Die Ethernet-Protokolle umfassen Festlegungen für Kabeltypen und Stecker sowie für Übertragungsformen (Signale auf der Bitübertragungsschicht, Paketformate). Es wurde ab den 1990ern zur meistverwendeten LAN-Technik.

3.2.3 KNX (Konnex-Bus)

Der Konnex-Bus (KNX) ist ein Standard, der beschreibt, wie in einer Installation u.a. Sensoren und Aktoren miteinander über ein Bus-/Protokoll-System verbunden werden können. Der Bus wurde im Jahre 2002 als Nachfolger aus dem Zusammenschluss der folgenden drei Bussysteme EIB, BatiBus und EHS konzipiert. KNX ist kompatibel zur vorhergehenden Norm EN 50090, welche den EIB-Standard normiert. Seinen Ursprung hat KNX in der Elektrobranche. Abbildung 3-2 zeigt ein Anwendungsbeispiel für die Gebäudeautomation mit KNX.

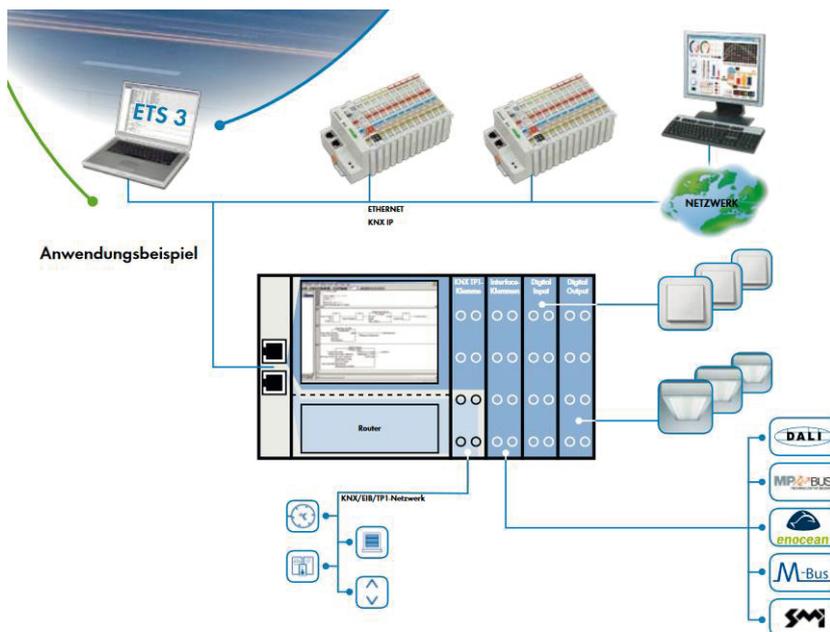


Abbildung 3-2: Anwendungsbeispiel für KNX/ Ethernet [82]

3.2.4 EIB (Europäischer Installationsbus)

Der Europäische Installationsbus (EIB) ist ein Standard nach EN 50090, der beschreibt, wie bei einer Installation Sensoren und Aktoren in einem Haus miteinander verbunden werden müssen. Er legt weiterhin das Kommunikationsprotokoll fest. Der EIB kann zum Beispiel die Beleuchtung, Beschattungseinrichtungen, die Heizung sowie die Schließ- und Alarmanlage steuern. Mittels EIB ist auch die Fernüberwachung und -steuerung eines Gebäudes möglich. EIB wird derzeit vor allem bei neuen Wohn- und Zweckbauten installiert, kann jedoch auch bei der Modernisierung von Altbauten nachträglich eingebaut werden. EIB-Installationen sind mittlerweile nicht nur im gehobenen Wohnungsbau zu finden. Es werden bereits auch bei preiswerten Fertighäusern EIB-Netzwerke in das Gebäude standardmäßig integriert. Die Kommunikation erfolgt über ein separates, zweipoliges Leitungsnetz oder, vor allem bei Nachrüstungen, über bestehende Stromleitungen mittels Powerline Communication.

3.2.5 BACnet

BACnet (Building Automation and Control Networks) ist ein Netzwerkprotokoll für die Gebäudeautomation. Es ist durch ASHRAE, ANSI und als ISO 16484-5 standardisiert. Mit BACnet wird die Kommunikation zwischen Produkten verschiedener Hersteller standardisiert. BACnet kann verschieden sprachige Feldbusse mit einander koppeln.

BACnet wurde und wird unter der Schirmherrschaft der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) entwickelt. Die Entwicklung begann im Juni 1987, um einen einheitlichen firmenneutralen Standard für die Datenkommunikation in und mit Systemen der Gebäudeautomation bereitzustellen. BACnet wurde im Jahr 1995 ANSI/ASHRAE-Norm 135. Im Januar 2003 wurde BACnet ISO-Norm 16484-5.

3.2.6 LON (Local Operating Network)

Local Operating Network (LON) ist ein Feldbus, welcher vorrangig in der Gebäudeautomatisierung eingesetzt wird. Die LON-Technologie ermöglicht den neutralen Informationsaustausch zwischen Anlagen und Geräten von verschiedensten Herstellern und unabhängig von den Anwendungen. Das Kommunikationsprotokoll von LON kann in beliebige Hardwarestrukturen implementiert werden und ermöglicht als offener Standard das Zusammenwirken verschiedener LonWorks[®]-Produkte unterschiedlicher Hersteller.

Die einzelnen Komponenten (bzw. Knoten) besitzen jeweils ihre eigene Intelligenz und können nahezu unabhängig voneinander verschiedene Programme abarbeiten, stellen hierbei jedoch auch Geräten in anderen Bereichen die jeweiligen Informationen zur Verfügung. Es wird zwischen Sensoren, Aktoren und Controllern unterschieden, der Datenaustausch erfolgt ereignisgesteuert.

Vom Institut für Gebäude- und Energiesysteme (Fachgebiet MSR-Technik, Gebäudeautomation und Energiemanagement) der Hochschule Biberach wurde 2016 das Weißbuch "Nachhaltiges Planen, Bauen und Betreiben durch Einsatz von Gebäudeautomation" erstellt [83]. Das Weißbuch soll als Leitfaden die Basis für eine gewerkeübergreifende und eine auf den Bedarf bzw. die Nutzung angepasste Gebäudeautomation liefern. Hierbei steht insbesondere die Planung im Vordergrund, welche die Grundlage für eine zielgerichtete und effiziente Ausführung und Nutzung im Betrieb bildet. (Auftraggeber LONmark)

3.2.7 M-BUS

Der M-Bus (Meter-Bus) ist ein (kostenoptimierter) Feldbus zur Übertragung von Energieverbrauchsdaten.

Ein zentraler Master kommuniziert über einen Zweidrahtbus mit den Busteilnehmern wie Wärme-, Wasser-, Elektro- und/ oder Gaszählern. Bis zu maximal 250 Zähler ("Slaves") können angeschlossen und abgerufen werden.

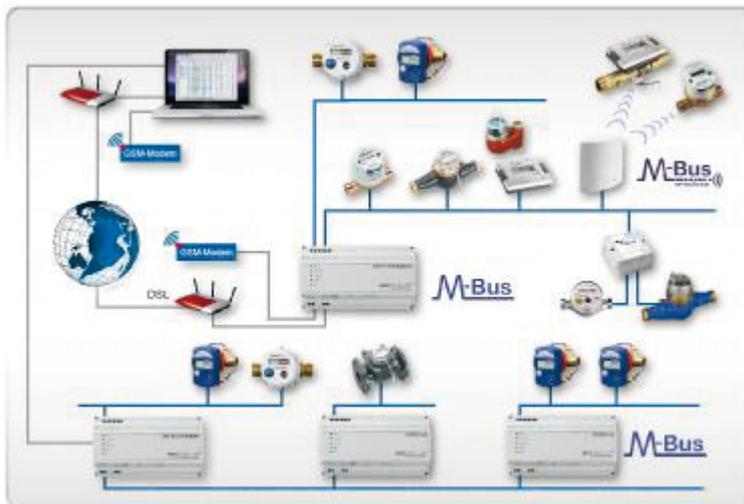


Abbildung 3-3: M-Bus System mit Fernablesung der Verbrauchsdaten von Wärme, Kälte Wasser, Gas und Elektrizität oder mit Analog-Modem, GSM/GPRS-Modem oder Internetverbindung [84]

3.2.8 MODBUS/TCP

Das MODBUS-TCP-Protokoll ist seit langem etabliert. Es baut auf dem seit 1979 bekannten MODBUS-Protokoll für speicherprogrammierbare Steuerungen auf. Im Gegensatz zur Industrie ist es in der Gebäudeautomation kein genormtes Protokoll. Neu ist, dass TCP/IP als Übertragungsmedium genutzt wird (ETHERNET-TCP/IP-basierte Client-Server-Kommunikation). Der besondere Vorteil für den Anwender besteht darin, dass MODBUS ein einfaches, schlankes Protokoll ist und daher eine sehr schnelle Datenübertragung auf dem Medium ETHERNET gewährleistet.

3.2.9 SMI

Das *Standard Motor Interface* ist ein Feldbus zum Ansteuern von elektronischen Antrieben, beispielsweise für Jalousien oder Rollläden. Er kann alleine benutzt werden, wird jedoch meist in höhere Bussysteme wie KNX/EIB, LON, BACnet eingebunden. Neben einfacherer Verkabelung ist vor allem die Rückmeldefähigkeit ein deutlicher Vorteil zu konventionellen Antrieben.

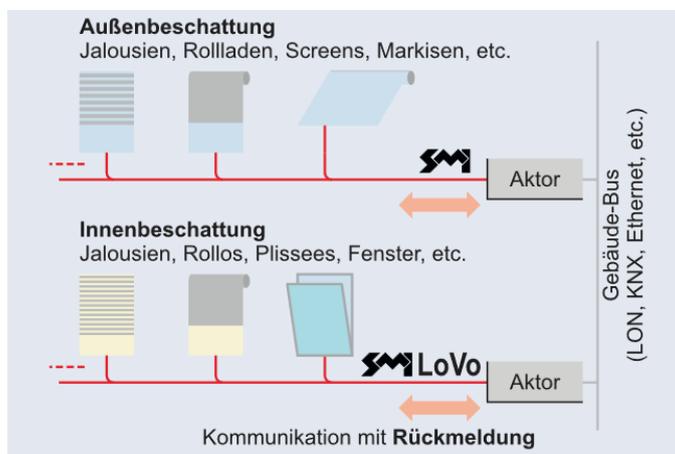


Abbildung 3-4: SMI für den Einsatz in verschiedenen Trägerprodukten für die Außen- und Innenverschattung [85]

In der SMI-Spezifikation ist der Informationsaustausch zwischen einer Steuerung und dem Rollladen- bzw. Sonnenschutzantrieb festgelegt. Der Austausch von Befehlen zum, sowie Rückmeldungen vom Antrieb, ist mittels Telegrammen eindeutig geregelt. Beispielsweise kann der Sonnenschutzbehang präzise angesteuert und positioniert werden.

Für die Hersteller von Antrieben und Steuerungen ist der SMI-Standard optimal. Sie können sich auf eine einwandfreie Funktion verlassen, auch wenn der Gegenpart nicht vom gleichen Hersteller geliefert wird.

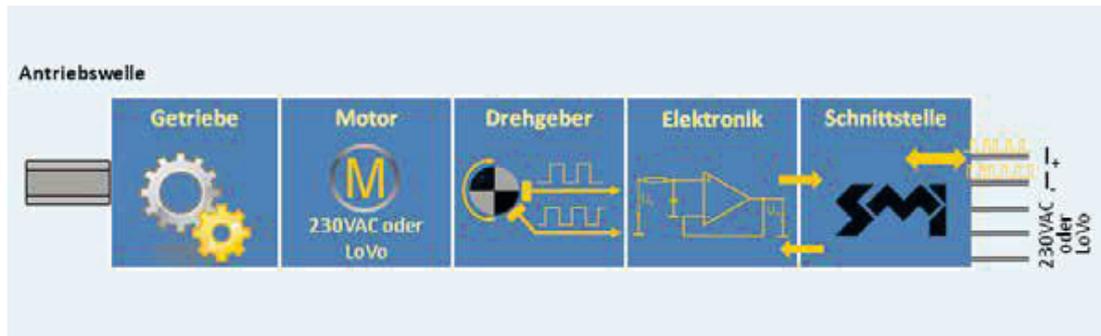


Abbildung 3-5: Funktionseinheiten des SMI-Antriebs (s. a. [85])

SMI kann grundsätzlich auch bei Antrieben für Fenster und Lichtkuppeln oder bei der Verstellung von Großlamellen eingesetzt werden.

3.2.10 Motorlink

Motorlink stellt eine eigenständige Schnittstelle zur Steuerung von motorisch betriebenen Fenstern dar [86]. MotorLink® ist mit allen gängigen Bus-Kommunikationsstandards wie KNX, LON, BACnet und Modbus kompatibel.

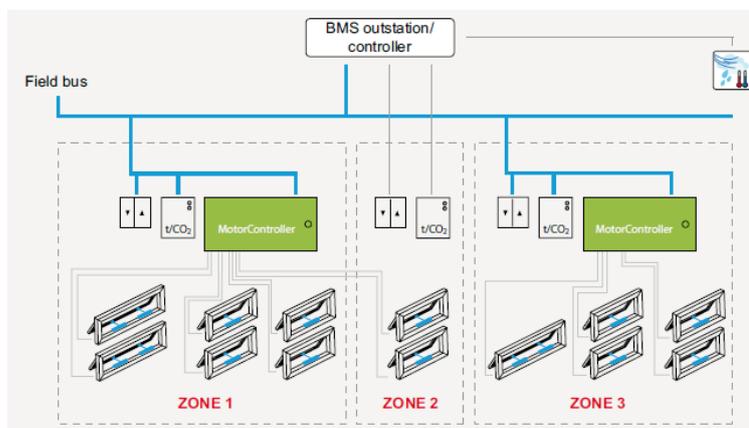


Abbildung 3-6: Typisches Beispiel für den Einsatz von Motorlink (s. a. [86])

Motorlink bietet u. a. folgende Funktionen:

- Exakte Positionssteuerung und Antriebsrückmeldung
- Dreistufige Antriebssteuerung
- Integrierte Echtzeitsynchronisation
- integrierte Reversierungs-Funktion

3.2.11 DALI

Das Digital Addressable Lighting Interface (DALI) ist ein Protokoll zur Steuerung digitaler, lichttechnischer Betriebsgeräte in Gebäuden (zum Beispiel elektronischer Transformatoren, EVGs, elektronischer Leistungsdimmer, Präsenzmelder etc.). Jedes Betriebsgerät, das über

eine DALI-Schnittstelle verfügt, kann über DALI-Kurzadressen einzeln angesteuert werden. Durch einen bidirektionalen Datenaustausch kann ein DALI-Steuergerät bzw. ein DALI-Gateway den Status von Leuchtmitteln bzw. von Betriebsgeräten einer Leuchte abfragen bzw. den Zustand setzen. DALI kann als "Inselsystem" mit maximal 64 Betriebsgeräten betrieben werden oder als Subsystem über DALI-Gateways in modernen Gebäudeautomationssystemen.

Der herstellerübergreifende DALI-Standard ist im IEC-Standard 62386 definiert und hat das Ziel, die Interoperabilität von Betriebsgeräten im Beleuchtungsbereich zu gewährleisten. Dieser Standard ersetzt die analoge 1V-10V-Dimmschnittstelle.

DALI kann grundsätzlich als eigenständiges System genutzt werden. In den meisten Fällen werden komplexere DALI Steuerungen über übergeordnete Bussysteme, wie z.B. KNX, BACnet oder Modbus, in ein komplettes Gebäudeautomationssystem eingebunden (s. a. [87]).

3.2.12 Funkbusse

Vorteil von Funkbussen gegenüber drahtgebundenen Bussen ist die einfache Nachrüstmöglichkeit und die Unabhängigkeit von jeglichen Leitungen. So können z. B. Lichtschalter auch noch nachträglich beliebig platziert werden.

Nachteile solcher Systeme ist, dass sie untereinander nicht oder nur bedingt kompatibel sind. Durch geschickte Auswahl der Frequenzen wird die Störanfälligkeit reduziert.

Zu den wichtigsten Protokollen bzw. Herstellern zählen:

- KNX-RF mit Funkübertragung auf 868 MHz des KNX-Standards
- EnOcean Alliance
- ZigBee
- IP500 Alliance
- Z-Wave Standard

3.3 Energieverbrauch Gebäudeautomation

Bei durchschnittlich energie-effizienten Gebäuden beläuft sich der jährliche Stromverbrauch der Gebäudeautomation (Raumautomation und primärseitige Gebäudeautomation) auf ein- bis zweistellige Prozentzahlen des jährlichen Endenergiebedarfs der Haustechnik (HLK und Beleuchtung). Absolut ergaben sich für die Raumautomation jährliche spezifische Stromverbrauchswerte von 2 bis 5 kWh/(m²a) (ohne primärseitige Gebäudeautomation).

Diese Werte wurden im Auftrag des Bundesamts für Energie der Schweiz in einem Projekt zur Bestimmung des Eigenenergieverbrauchs in der Gebäudeautomation durch die Hochschule Luzern ermittelt [88]. Im Rahmen dieses Projektes wurden zunächst GA-Komponenten im Labor ausgemessen. In einem zweiten Schritt wurden realisierten GA-Lösungen (Objektanalysen) durchgeführt.

Es zeigt sich, dass die GA-Funktionalität und der dazu benötigte Stromverbrauch der GA-Geräte kaum miteinander korrelieren; für die Summe deren Stromverbräuche sind vielmehr die konkrete Produktwahl und die Systemgestaltung maßgebend.

Aus dem Projekt resultieren Empfehlungen an Planer und Hersteller hinsichtlich eines möglichst geringen Stromverbrauchs der Gebäudeautomation.

3.4 Planung Gebäudeautomation

Die Gebäudeautomation stellt im Bauprozess einen sehr wichtigen und für den Betrieb des Gebäudes entscheidenden Faktor dar. Mit Hilfe einer gut geplanten und ausgeführten Gebäudeautomation lassen z. T. hohe Einsparpotentiale erschließen.

Es gibt eine Vielzahl von Fachartikeln und Büchern zur grundlegenden Konzeption und Planung einer Gebäudeautomation. Exemplarisch soll hier vor allem auf die "Hinweise für Planung, Ausführung und Betrieb der Gebäudeautomation in öffentlichen Gebäuden (Gebäudeautomation 2005)" und die Ergänzung von 2013 des Arbeitskreises Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (kurz: AMEV) hingewiesen werden [89].

Aufbauend auf den langjährigen Erfahrungen der öffentlichen Verwaltungen und wichtigen Grundlagen wie der DIN EN ISO 16484, VDI 3814 und DIN 18386 werden hier die wichtigsten GA-Komponenten und die Grundsätze für Grundlagenermittlungen, Wirtschaftlichkeit, Energieeinsparung und zukunftssichere Bedien- und Automationskonzepte erläutert. Dabei werden bewährte Vorgehensweisen benannt und neue Orientierungsrahmen aufgezeigt. Der Anhang enthält vor allem praktische Arbeitshilfen und benennt zahlreiche Projektbeispiele für erfolgreiche herstellerübergreifende Systemintegrationen in öffentlichen Gebäuden.

Bei der Planung der Gebäudeautomation nimmt die Grundlagenermittlung einen besonderen Stellenwert ein, da es keine allgemeingültigen Lösungen für eine GA gibt. Im Rahmen der Grundlagenermittlung bzw. vor Beginn der GA-Planung sind u. a. folgende Fragen zu klären:

- Welche wesentlichen Ziele werden durch den GA-Einsatz verfolgt (z. B. Qualitäts- und Nutzungsanforderungen, Energieeinsparung, effizienter Personaleinsatz, dokumentierter Anlagenbetrieb)?
- Welches Betriebspersonal mit welcher Qualifikation steht künftig für die Bedienung und Betreuung zur Verfügung?
- Wie soll das Gebäude und die technischen Anlagen künftig betrieben werden?
- Welche Gewerke und Systeme sollen in die GA integriert werden (HKLS, Elektro-, Kommunikationstechnik, Förderanlagen, nutzerspezifische Anlagen, usw.)?
- Welche vorhandenen GA-Systeme und Datenpunkte sollen berücksichtigt werden (Art und Anzahl, topographische Verteilung)?
- Gibt es Vorgaben hinsichtlich der einzusetzenden Fabrikate?

Ein oft unterschätztes Problem stellt die Klärung der künftigen Bedienung, Wartung und Nutzung der GA dar. Aus den unterschiedlichen Bedürfnissen resultiert ein nicht unerheblicher Abstimmungsaufwand. Die verschiedenartigen Anforderungen an die GA müssen frühzeitig ermittelt, koordiniert und eingeplant werden.

Soll z. B. aus Kostengründen auf eine Gebäudeautomation ganz oder teilweise verzichtet werden, so sollte dennoch die entsprechende Vorplanung und Verlegung der Verkabelung für die entsprechenden Nutzungen vorgesehen werden, so dass eine spätere Nachrüstung problemlos möglich ist.

4 Richtlinien und Normen

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über Richtlinien und Normen, welche die Gebäudeautomatisierung betreffen oder in Teilen erfassen.

4.1 VDI 3813 und VDI 3814

In der VDI 3813 geht es um die **Raumautomation** (insbesondere um Raumautomationsfunktionen), in der VDI 3814 um die **Anlagenautomation**:

- VDI 3813 – 1 Gebäudeautomation (GA) – Grundlagen der Raumautomation (Mai 2011) [90]
- VDI 3813 – 2 Gebäudeautomation (GA) – Raumautomationsfunktionen (Mai 2011) [91]
- VDI 3813 – 3 Gebäudeautomation (GA) – Anwendungsbeispiele für Raumtypen und Funktionsmakros in der Raumautomation (Februar 2015) [92]

Die VDI 3814 wird derzeit umfassend überarbeitet, erste Entwürfe der Neubearbeitung liegen seit Juli 2017 vor.

- VDI 3814 – 1 Gebäudeautomation (GA); Systemgrundlagen (Nov. 2011)
- VDI 3814 – 2 Gebäudeautomation (GA); Gesetze, Verordnungen und technische Regeln (Juli 2009)
- VDI 3814 – 3 Gebäudeautomation (GA); Hinweise für das Gebäudemanagement; Planung, Betrieb und Instandhaltung (Juni 2007)
- VDI 3814 – 3.1 Gebäudeautomation (GA); Hinweise für das Gebäudemanagement; Planung, Betrieb und Instandhaltung; Schnittstelle zum Facility-Management (Sep. 2012)
- VDI 3814 – 5 Gebäudeautomation (GA); Hinweise zur Systemintegration (März 2010)
- VDI 3814 – 6 Gebäudeautomation (GA); Grafische Darstellung von Steuerungsaufgaben (Juli 2008)
- VDI 3814 – 7 Gebäudeautomation (GA); Gestaltung von Benutzeroberflächen (Mai 2012)

4.2 DIN EN 15232 Energieeffizienz von Gebäuden, Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement

Die DIN EN 15232-2 "Energieeffizienz von Gebäuden, Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement ist" erschien erstmalig im Nov. 2007, die aktuelle Ausgabe ist vom Sep. 2012 [93]. Leitgedanke der DIN EN 15232-2 ist, die Energieverschwendung, die als Folge einer nicht an die Nutzung angepassten Energieabgabe entsteht, zu vermeiden. Dies erfolgt maßgeblich über die Kontrolle der Übergabe, also innerhalb der Räume.

Ziel bei der Erarbeitung der DIN EN 15232-2 war es, Konventionen und Verfahren zur Abschätzung der Auswirkungen von Gebäudeautomationssystemen und Maßnahmen des technischen Gebäudemanagements auf die Energieeffizienz und den Energieverbrauch von Gebäuden festzulegen. Die Norm enthält eine strukturierte Liste von Funktionen der Gebäudeautomation und des technischen Gebäudemanagements, die Auswirkungen auf die Energieeffizienz von Gebäuden haben. In Tabelle 1 der DIN EN 15232 sind die gängigsten GA- und TGM-Funktionen beschrieben und zusammengefasst (für eine zusammengefasste Darstellung s. a. Tabelle A-3 in Anhang A). Die in der DIN EN 15232-2 zur Anwendung kommenden Raumautomationsfunktionen werden in der Richtlinie VDI 3813 Blatt 2 beschrieben.

4.2.1 Effizienzklassen

Die DIN EN 15232 gibt vier Effizienzklassen (A – D) für Gebäude und Wohnhäuser an, wobei die Klasse “C” die Referenzklasse darstellt und “A” die bestmögliche Klasse. In Tabelle 2 der DIN EN 15232 werden die oben beschriebenen GA- und TGM Funktionen je nach ihrer Anwendung in Wohn – oder Nicht-Wohngebäude den einzelnen Effizienzklassen zugeordnet. Mindestanforderungen von GA- und TGM-Funktionen, die der GA-Effizienzklasse C entsprechen sind in Tabelle 3 der DIN EN 15232 aufgelistet. Eine allgemeine Formulierung der Effizienzklassen A – D ist in Tabelle 4-1 dargestellt. In Tabelle 4-2 sind Effizienzklassen exemplarisch für die verschiedenen Möglichkeiten des Sonnenschutzes gezeigt.

Tabelle 4-1: Allgemeine Formulierung der Effizienzklassen A - D

Klasse	Energieeffizienz
A	Entspricht hoch energieeffizienten GA-Systemen und TGM: <ul style="list-style-type: none"> • Vernetzte Raumautomation mit automatischer Bedarfserfassung • Regelmäßige Wartung • Energiemonitoring • Nachhaltige Energieoptimierung
B	Entspricht weiterentwickelten GA-Systemen und einigen speziellen TGM-Funktionen: <ul style="list-style-type: none"> • Vernetzte Raumautomation ohne automatische Bedarfserfassung • Energiemonitoring
C	Entspricht Standard-GA-Systemen: <ul style="list-style-type: none"> • Vernetzte GA der Primäranlagen • Keine elektronische Raumautomation, Thermostatventile an Heizkörpern • Kein Energiemonitoring
D	Entspricht GA-Systemen, die nicht energieeffizient sind. Gebäude mit derartigen Systemen sind zu modernisieren. Neue Gebäude dürfen nicht mit derartigen Systemen gebaut werden: <ul style="list-style-type: none"> • Keine vernetzten GA-Funktionen • Keine elektronische Raumautomation • Kein Energiemonitoring

Tabelle 4-2: Effizienzklassen für Regelung der Beleuchtung und beweglicher Sonnenschutzeinrichtungen gemäß DIN EN 15232 Tabelle 2

	Definition der Klassen	Regelung entsprechend der Belegung			Regelung des Tageslichteinfalls		Regelung der beweglichen Sonnenschutzeinrichtungen			
		Manuell zu betätigender Ein-/ Ausschalter	Manuell zu betätigender Ein-/ Ausschalter und zusätzliches automatisches Ausschaltsignal	Automatische Erkennung	Manuell	Automatisch	Manuelle Betätigung	Motorbetrieben mit manueller Regelung	Motorbetrieben mit automatischer Regelung	Kombinierte Regelung der Beleuchtung/ der Sonnenschutzeinrichtung/ der HUK-Anlagen
Wohngebäude	A			●		●				●
	B		●	●	●	●			●	●
	C	●	●	●	●	●		●	●	●
	D	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Nicht-Wohngebäude	A			●		●				●
	B			●		●				●
	C		●	●	●	●			●	●
	D	●	●	●	●	●	●	●	●	●

4.2.2 Einfache und detaillierte Effizienzfaktoren

Für eine einfache Berechnung der Auswirkungen der Funktionen der Gebäudeautomation und des Gebäudemanagements auf die Energieeffizienz des Gebäudes wurde das sog. GA-Faktor-Verfahren entwickelt. Das Verfahren erlaubt eine grobe Abschätzung der Auswirkungen von GA- und TGM-Funktionen auf den Bedarf des Gebäudes an thermischer und elektrischer Energie entsprechend den Effizienzklassen A, B, C und D. Die DIN 15232 bietet zusätzlich aber auch die Möglichkeit auf detaillierte Effizienzfaktoren zurückzugreifen oder ein ausführliches Berechnungsverfahren zu wählen.

Tabelle 4-3 zeigt exemplarisch die detaillierten Effizienzfaktoren für Beleuchtung und Hilfsenergie. Entsprechende Effizienzfaktoren liegen auch für die Raumheizungsanlage, für die Trinkwarmwasserbereitung, für die Kühlung und für die Lüftung vor.

Tabelle 4-3: Detaillierte GA-Effizienzfaktoren für Beleuchtung und Hilfsenergie für Nichtwohngebäude nach DIN 15232 (s. a. [93])

Effizienzklasse			Büros	Hörsäle	Schulen und Bildungseinrichtungen	Krankenhäuser	Hotels	Restaurants	Gebäude für Groß- und Einzelhandel
A	hohe Energieeffizienz	f_BACS,el-li	0,72	0,76	0,76	1	0,76	1	1
		f_BACS,el-au	0,72	0,78	0,74	0,96	0,78	0,92	0,91
B	erhöhte Energieeffizienz	f_BACS,el-li	0,85	0,88	0,88	1	0,88	1	1
		f_BACS,el-au	0,86	0,88	0,87	0,98	0,89	0,96	0,95
C (Referenz)	Standard	f_BACS,el-li	1	1	1	1	1	1	1
		f_BACS,el-au	1	1	1	1	1	1	1
D	nicht energieeffizient	f_BACS,el-li	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1
		f_BACS,el-au	1,15	1,11	1,12	1,1	1,12	1,09	1,13

Im (informativen) Anhang B der DIN EN 15232 wird das Verfahren zur Bestimmung der Effizienzfaktoren des GA-Systems beschrieben. Die GA-Effizienzfaktoren wurden auf der Grundlage der Ergebnisse einer großen Anzahl von Simulationsläufen mittels TRNSYS für den Standort Würzburg berechnet. Die Auswirkungen unterschiedlicher GA- und TGM-Funktionen auf die Energieeffizienz von Gebäuden wurde durch Vergleich des jährlichen Energieverbrauchs eines standardisierten Raumes für unterschiedliche GA- und TGM-Funktionalitäten festgestellt, die die definierten GA-Effizienzklassen repräsentieren.

In Anhang D (informativ) der DIN 15232 wird der Faktor für die optimierte Sonnenschutzregelung definiert. Bei kombinierter Regelung der Beleuchtung und des Sonnenschutzes dürfen die solaren Gewinne um den Faktor $f_{BAC, SD} = 0,94$ reduziert werden.

4.2.3 Ausführliches Berechnungsverfahren

Wichtig ist, dass das ausführliche Berechnungsverfahren nur angewandt werden sollte, wenn ausreichende Kenntnisse zu den genutzten Automations- und Managementfunktionen vorliegen. Die DIN 15323-2 greift bei den ausführlichen Berechnungsverfahren auf eine Vielzahl von Normen zurück (s. a. Tabelle A1 der DIN 15323-2).

Die verwendeten Normen verwenden unterschiedliche Ansätze bei der Berechnung der Auswirkungen der GA- und TGM-Funktionen auf den Energieverbrauch. Folgende fünf Ansätze sind aber den verschiedenen Normen gemeinsam:

- der direkte Ansatz
- der betriebsartbezogene Ansatz
- der zeitbezogene Ansatz
- der temperaturbezogene Ansatz

- der korrekturkoeffizientenbezogene Ansatz

Im Folgenden werden diese Ansätze kurz erläutert

- Direkter Ansatz:

Im direkten Ansatz kommt in der Regel ein Simulationsverfahren zur Anwendung, mit dem es möglich ist, die Auswirkungen von Funktionen direkt zu berechnen, z. B.

- die eines intermittierenden Heizbetriebs,
- die einer variierenden Temperatur zwischen den Sollwerten für den Heiz- und den Kühlbetrieb,
- die einer beweglichen Sonnenschutzeinrichtung

Dieser Ansatz ist nicht relevant, wenn Monatsverfahren angewendet werden. Der direkte Ansatz nicht verwendet werden, wenn die Auswirkungen der Regelung zu zeitlichen Variationen führen, die kürzer sind als der Simulationszeitschritt.

- Betriebsbezogener Ansatz:

Der betriebsbezogene Ansatz zur Berechnung der Auswirkungen einer automatischen Regelung auf den Energieverbrauch besteht darin, den Energieverbrauch sequentiell für jede Betriebsart zu berechnen und aufzusummieren. Beispielsweise ermöglicht eine automatische Regelung den Betrieb von Klima- oder Lüftungsanlagen bei verschiedenen Zuständen wie Belegung/keine Belegung, Heizbetrieb/ kein Heizbetrieb, minimale Lüftung / maximale Lüftung. Jede Betriebsart entspricht dabei einem bestimmten Zustand der Regeleinrichtung.

- Zeitbezogener Ansatz:

Dieser Ansatz kann gewählt werden, wenn die Regeleinrichtung direkte Auswirkungen auf die Betriebszeit eines Geräts hat (z. B. Regelung eines Gebläses, einer Leuchte).

Der Energieverbrauch für einen bestimmten Zeitabschnitt ergibt sich nach der folgenden Gleichung:

$$E = P \cdot t \cdot f_c$$

E	Energie
P	Eingangsleistung
t	Zeitraum
f_c	charakteristischer Koeffizient

Der charakteristische Koeffizient f_c stellt die Auswirkungen der Regeleinrichtung dar. Er ergibt sich aus dem Verhältnis der Zeit, zu der die Regeleinrichtung die Anlage einschaltet, und der Länge des Zeitabschnitts.

- Raumtemperaturbezogener Ansatz

Der Raumtemperaturbezogene Ansatz kann gewählt werden, wenn die Regeleinrichtung direkte Auswirkungen auf die Raumtemperatur hat. Er besteht darin, bei der Berechnung des Energiebedarfs nach EN ISO 13790:2008 eine korrigierte Raumtemperatur in Betracht zu ziehen, die die Auswirkungen der Regeleinrichtung berücksichtigt.

- Korrekturkoeffizientenbezogener Ansatz

Dieser Ansatz wird gewählt, wenn die Regeleinrichtung einen komplexeren Einfluss ausübt, beispielsweise eine kombinierte Auswirkung auf Zeit, Temperatur u.s.w.

4.3 DIN EN ISO 16484

Die DIN EN ISO 16484 beschäftigt sich mit "Systemen der Gebäudeautomation" und teilt sich wie folgt auf:

- Teil 1: Projektplanung und -ausführung
- Teil 2: Hardware
- Teil 3: Funktionen
- Teil 5: Datenkommunikationsprotokoll
DIN EN ISO 16484-5 stellt ein Kommunikationsverfahren zur Verfügung, mit dem Geräte der Gebäudeautomation untereinander Informationen austauschen können, unabhängig von der gebäudetechnischen Anlage, zu der sie gehören.
- Teil 6: Datenübertragungsprotokoll - Konformitätsprüfung
DIN EN ISO 16484-6 stellt ein genormtes Testverfahren zur Verfügung, um eine Implementierung des BACnet-Protokolls auf ihre Konformität zur Protokoll-Norm DIN EN ISO 16484-5 zu überprüfen.

4.4 DIN V 18599

Die DIN V 18599:2016-10 befasst sich mit der Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung von Gebäuden.

Die DIN V 18599 besteht insgesamt aus 12 Teilen. Die Teile 1 bis 10 beschreiben ausführlich die Verfahren zur energetischen Bewertung eines Gebäudes. Hier werden u. a. die für den Betrieb von Heizungs-, Trinkwarmwasser-, Lüftungs-, Klima- und Beleuchtungsanlagen relevanten Steuer-, Regel- und Automationsfunktionen berücksichtigt. Teil 12 stellt ein Tabellenverfahren zur energetischen Bilanzierung von Wohngebäuden bereit.

In Teil 11 wird der Bereich der Gebäudeautomation gesondert behandelt. Da die den jeweiligen Prozessbereichen zugeordneten Funktionen in den entsprechenden Normenblättern bereits detailliert beschrieben werden, werden im Teil 11 keine bereits vorhandenen Berechnungsmethoden und Einflussparameter neu formuliert oder modifiziert wiedergegeben. Teil 11 stellt vielmehr den Einfluss der Steuerung und Regelung sowie der Raum- und Gebäudeautomation einschließlich des technischen (energetischen) Gebäudemanagements auf den Energiebedarf eines Gebäudes im Betrieb dar. Dabei hat insbesondere das Energiemanagement als Teil des übergeordneten Gebäudemanagements zur Koordination der Verteilung und Nutzung der Energie im Gebäude eine große Bedeutung im Hinblick auf einen energieeffizienten Gebäudebetrieb. Diese Norm beschreibt daher auch die Energiemanagementfunktionen und deren Wechselwirkungen mit den anderen Bereichen der Energieanwendung im Gebäude.

Das vorliegende Bewertungsverfahren der DIN V 18599 - 11 ist geeignet, den besonderen Einfluss von Raum- und Gebäudeautomation sowie des technischen Gebäudemanagements (zum Beispiel Energiemanagement, Monitoring) auf die Energieeffizienz von Gebäuden transparent und zusammenfassend darzustellen. Dies ist notwendig, da die Bedeutung der gewerkeübergreifende Steuerungs-, Regelungs- und Automationstechnik sowie des Gebäudemanagements für einen energetisch effizienten Gebäude- und Anlagenbetrieb zwar bekannt und anerkannt, aber nicht ausreichend quantifizierbar ist.

Das Bewertungsverfahren der der DIN V 18599 - 11 orientiert sich grundsätzlich an der Vorgehensweise aus DIN EN 15232. Es ist jedoch ausdrücklich auf das Bewertungsverfahren der Normenreihe DIN V 18599 ausgerichtet und angepasst. Ziele des Teil 11 der DIN V 18599 sind:

- Darstellung der prinzipiellen Möglichkeiten des Einflusses der Gebäudeautomation und des Gebäudemanagements auf den Anlagen- und Gebäudebetrieb
- Aufzeigen von grundlegende Bewertungsansätze für die Energieeffizienz von Gebäuden durch Art und Umfang von Raum- und Gebäudeautomation sowie von Gebäudemanagementfunktionen
- Zusammenfassende Darstellung der in den einzelnen Normenteilen der DIN V 18599 verwendeten Steuer-, Regel- und Automationsfunktionen beziehungsweise -parameter
- Systematisierung der Steuer-, Regel- und Automationsfunktionen im Hinblick auf ihr mögliches Potenzial für einen energieeffizienten Gebäudebetrieb
- Ableitung eines geeigneten Verfahrens zur Berechnung des Einflusses von Raum- und Gebäudeautomation sowie des Gebäudemanagements auf den Primärenergiebedarf von Gebäuden
- Aufzeigen von innovativen und gegebenenfalls in anderen Normen und Richtlinien bereits definierte Steuer-, Regel- und Automationsfunktionen, die bisher in keinem der vorliegenden Normenteile der DIN V 18599 behandelt worden sind

Gemäß DIN V 18599-11 (von 2016-10) gelten folgende Automatisierungsgrade:

- **Klasse C enthält Standardwerte** für Gebäudeautomationsfunktionen, die – sofern keine weiteren Informationen zu einzelnen Automationsfunktionen vorliegen – für die Berechnung der Energiebedarfswerte zu verwenden sind.
- Automatisierungsgrad B erfordert über die Klasse C entsprechende Standardwerte hinaus den Einsatz von Gebäude- und Automationsfunktionen. Einzelne Regeleinrichtungen müssen in der Lage sein, untereinander oder mit einem übergeordneten Gebäudemanagementsystem zu kommunizieren.
- Klasse A kann nur erreicht werden, wenn zusätzliche zum Funktionsumfang von Klasse B Funktionen des energetischen Gebäudemanagements umgesetzt werden. Dazu gehören beispielsweise Verriegelung zwischen Heizung und Kühlung, Monitoring oder Sollwertoptimierung.
- Klasse D umfasst alle die Fälle, die die Standardwerte nach Klasse C nicht erfüllen. Ein energieeffizienter Gebäudebetrieb nach dem Funktionsumfang der Klasse D ist nicht möglich.
- Der Funktionsumfang für die Klassen A, B, C und D für Gebäudeautomation und Gebäudemanagement unterscheidet sich für Wohngebäude und Nichtwohngebäude.

5 Projekte und Best-Practice-Beispiele

5.1 Projekte

5.1.1 benefit E

Das Projekt "benefit E" der TU Darmstadt befasst sich ausführlich mit Strategien zur Beseitigung technischer, wirtschaftlicher, planerischer und rechtlicher Hemmnisse bei gebäudeintegrierten solaraktiven Systemen (insbesondere Photovoltaik und solarthermische Systeme) [4]. Das Projekt wurde von Mitte Dezember 2013 bis Ende Oktober 2015 durchgeführt. Das Projekt basiert auf zahlreichen, zum Teil sehr ausführlichen Experteninterviews mit allen am Bauprozess beteiligten Akteuren wie Industrie, Baugewerbe, Architekten, Ingenieure, Bauherren, Energieversorger, Verbänden und Politik.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass es in allen Bereichen umfassende Hemmnisse bei der Integration solaraktiver Systeme in die Gebäudehülle gibt. Die wesentlichen Hürden hierbei liegen in der bisherigen isolierten Entwicklung aktiver Systeme als technisches Element und Modul und nicht als architektonisches Bauteil. Der Herstellungsprozess selber ist bislang ausschließlich auf die Produktion hoher Stückzahlen optimiert. Eine individuelle Anpassung auf variierende Bedürfnisse der Architektur ist nur begrenzt möglich.

Im Bereich des Planungsprozesses sind vor allem die zunehmende Komplexität der Komponenten, mangelnde Akzeptanz, Kenntnis und Nachfrage als Hemmnis zu nennen. Zudem wird mehrfach bemängelt, dass sich der Planungsaufwand bei der Einbindung solaraktiver Systeme durch das begrenzte Architektenhonorar nicht abbilden ließe.

Die Industrie beklagt, dass Planer ihre Wünsche nicht immer zielgerichtet an die Hersteller herantrügen. Folge davon sei, dass die Industrie damit oftmals auf sich selbst gestellte entsprechende Produkte mit potenzieller Nachfrage entwickeln müsste. Demzufolge haben die Planer eine Schlüsselrolle bei der Beseitigung der genannten Hemmnisse. Hierbei gilt es Vorbehalte und Wissenslücken abzubauen und den Planer als Initiator für eine weitere Verbreitung solaraktiver Systeme zu gewinnen. Die generalistische und koordinative Arbeitsweise von Architekten wird dabei als besonders förderlich betrachtet.

Als weiteres Hemmnis wird der Errichtungsprozess und die Ausführung identifiziert. Aufgrund der bisher nicht in ausreichendem Maße vorliegenden Produktvielfalt, treten auf der Baustelle immer wieder Fragen der Zuständigkeit auf. Hierbei gilt es Schnittstellen und Verantwortlichkeiten für zukünftige Entwicklungen zu klären und insbesondere das Baugewerbe mit den neuen Technologien vertraut zu machen.

5.1.2 plusFASSADEN

Das Projekt "plusFassaden - Internationaler Know-how- und Wissenstransfer über „intelligente Fassadensysteme“ für österreichische AkteurInnen und KompetenzträgerInnen" wurde 2011 am Österreichischen Institut für Baubiologie und -ökologie abgeschlossen [94].

Das Projekt plusFassaden geht von der Idee aus, dass vorgefertigte intelligente Fassadensysteme für die energieeffiziente Sanierung von Bauten eine zukunftsträchtige Technologie darstellen. Dabei muss dem Mehrfachnutzen der Gebäudehülle in der Entwicklung zum „Plus-Energie-Gebäude“ ein besonders hoher Stellenwert eingeräumt werden. Ziel des Projektes war es, den derzeitigen Stand der Technik und das vorhandene Wissen für Akteure in Österreich zielgruppengerecht aufzubereiten und nutzbar zu machen. Das Ergebnis dieser Studie richtet sich vorwiegend an Planer und Entscheidungsträger im bauausführenden Gewerbe.

Folgende Fassadentypen werden detailliert dokumentiert: Holzfassaden, Hybridfassaden, Speicherfassaden, solaraktive Fassaden, Energiefassaden, grüne Fassaden und intelligente

Fassaden. Zusätzlich werden zehn Best-Practice-Beispiele ausgewählt und umfassend beschrieben.

Anders als im Projekt "benefit E" (s. a. Abschnitt 5.1.1) sehen die Autoren der Studie den nächsten Schritt zur Verbreitung der jeweiligen Technologien in der Standardisierung der vorgefertigten Elemente, so dass die Systeme auch preislich konkurrenzfähig sind.

5.1.3 DeAL - Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme

In dem Forschungsprojekt DeAL werden 10 Gebäude mit außenwandintegrierten Lüftungssystemen im realen Betrieb hinsichtlich Komfort, Nutzer- und Betreiberzufriedenheit sowie Energieeffizienz untersucht ([95], [96]). Im Rahmen des Projektes erfolgte ein Vergleich auf Simulationsbasis von zentralen und dezentralen Systemen:

Die Druckverluste, die zur Berechnung der erforderlichen Ventilatorleistung im zentralen System wichtig sind, werden nach Ansicht der Verfasser des vorliegenden Berichts (deutlich) zu hoch abgeschätzt. Allein dadurch schneidet in dieser Studie das zentrale System schon wesentlich schlechter ab, so dass eine belastbare Aussage problematisch ist.

Kosten werden zwar thematisiert, sind aber nur grob dargestellt, da eine detailliertere Darstellung nicht möglich war.

5.1.4 KonLuft – Energieeffizienz von Gebäuden durch kontrollierte Lüftung

Das Projekt KonLuft wurde von Mai 2013 bis April 2016 unter Federführung der Hochschule für Technik in Stuttgart durchgeführt [97].

Ausgangspunkt des Projektes ist, dass natürliche Lüftung von Gebäuden zu signifikanten Primärenergieeinsparungen führen kann, wenn dadurch der sommerliche Kühlenergiebedarf reduziert wird. Voraussetzung dafür ist, dass die Öffnung der Fenster kontrolliert gesteuert werden kann, so dass auch in Zeiten der Nichtbelegung eine Kühlung möglich ist.

Im Rahmen des Vorhabens wurden systematisch die Einsparpotentiale von motorisch gesteuerter natürlicher Lüftung untersucht. Dabei wurden ausführliche Messungen an ausgewählten Gebäuden vorgenommen sowie umfassende Simulationsrechnungen zur Vergleichszwecken durchgeführt.

Als Ergebnis zeigt sich, dass eine kontrollierte natürliche Lüftung zu signifikanten Primärenergie- und Kosteneinsparungen führen kann.

5.1.5 AUTIFAS - Automatisierung innovativer Fassadensysteme mit integrierter technischer Gebäudeausrüstung unter Berücksichtigung von Behaglichkeitsaspekten

Das primäre Ziel dieses Forschungsprojektes "AUTIFAS" war die Entwicklung einer modularen Automationsbibliothek für Fassaden [98]. Das Projekt wurde im September 2012 an der Hochschule für angewandte Wissenschaft in Biberach abgeschlossen.

Die Automationsbibliothek für die Fassadenautomation wurde exemplarisch für die im Vorhaben untersuchte Testfassade inklusive der versorgungstechnischen Einrichtungen zum Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten entworfen und auf einer Automationsstation umgesetzt, getestet und ausführlich dokumentiert. Die bekannten Regelstrategien und Bibliotheksmodule der Raumklimatik dienten hierbei als Grundlage für die Entwicklung der modularen Automationsbibliothek für die Fassadenautomation. Die Umsetzung erfolgte gemäß den Energieeffizienzklassen nach DIN EN 15232, der Funktionsdarstellung nach VDI 3813 /VDI 3814 und den Automations Sprachen nach IEC 61131.

5.1.6 Glasarchitektur – Lehren aus einem Großversuch

Zur Glasarchitektur im Allgemeinen gibt es einen sehr aufschlussreichen Artikel „Glasarchitektur – Lehren aus einem Großversuch“ von Werner Eicke-Henning [99], der Artikel ist u. a. in der deutschen Bauzeitung veröffentlicht worden (03.05.2004). Hier diskutiert der Autor anhand von 24 – teilweise repräsentativen Beispielen – die Sinnhaftigkeit von Bürobauten mit großflächigen Glasfassaden. Zusammenfassend konstatiert Eicke-Henning, dass in den diskutierten Gebäuden

- unangenehm hohe Raumtemperaturen auftreten, die teilweise deutlich über der herrschenden Außentemperatur liegen
- die ursprünglich gewünschte „natürliche“ Belüftung aus dem Zwischenraum der Fassade eine Vielzahl von Problemen wie Hitze, Verkeimung, Schall mit sich bringt
- trotz vorgesehener „natürlicher Belüftung“ eine Vielzahl von Gebäuden mit Lüftungs- und Klimatisierungsgeräten ausgestattet sind
- realisierte Energieverbräuche nur sehr selten kommuniziert werden und auch auf Nachfrage nicht erhältlich sind, die Energieverbräuche sind – falls vorhanden – oftmals verheerend hoch.
- Lüftungs- und Sonnenschutzkonzept beliebig scheinen

Eicke-Henning weist darauf hin, dass bereits 1999 von Prof. Gertis anhand umfassender Untersuchungen gezeigt wird, dass in Gebäude mit doppelschaligen Glasfassaden Probleme unter hohem technischen Aufwand gelöst werden müssen, die man nicht hätte, wäre auf die doppelschalige Fassade verzichtet worden (s. a. [100]).

5.1.7 Dissertation zum Planungs- und Schnittstellenmanagement auf Baustellen

Ein interessanter Beitrag zur Problematik des Schnittstellenmanagement bei Planung und Ausführung liefert die Dissertation „Optimierungsanalysen und -ansätze des Planungs- und Schnittstellenmanagements vor Baubeginn im Vergleich zur baubegleitenden Planung“ von S. Schölzel [101], die 2012 abgeschlossen wurde.

In der Arbeit werden Schnittstellen zwischen den Projektpartnern, die am Planungs- und Bauprozess unmittelbar beteiligt sind, betrachtet, um daraus Optimierungspotentiale abzuleiten. Durch wissenschaftliche Untersuchungen wird gezeigt, dass durch ein wirkungsvolles Schnittstellenmanagement und vorzeitige Klärung aller Planungsparameter das Ziel der Baukosten- und Planungssicherheit erreicht werden kann.

Im vorliegenden Kontext ist vor allem die Auswertung einer durchgeführten Fragebogenaktion unter mehr als 700 Objektplanern und Projektsteuerern interessant. So zeigt sich beispielsweise, dass 74 % aller Befragten die Einbeziehung fachlich Beteiligter und Sonderfachleute im Stadium der Planungsphasen LP 1 – 3 für sehr wichtig erachten. Bei der Frage, bei welchen Schnittstellen für Architekten häufig Probleme in der Integration anderer fachlicher Beteiligter auftreten, werden von 50 % der Befragten die TGA-Planung angeführt. 64 % der Befragten geben an, dass es unabdingbar sei, persönliche Gespräche zu führen. Als wichtiges Instrument werden hier beispielsweise Jour-Fix Termine genannt. Als häufigste Schwachstelle werden bei der Frage, welche Schwachstellen und Hemmnisse es häufig im Kooperations- und Kommunikationsprozess aller fachlich Beteiligten gibt, mit 43 % fachübergreifende Unkenntnisse genannt, mit 21 % Kompetenzprobleme und mit 15 % Gewährleistungsprobleme.

5.1.8 Integrales Bauen und die Zukunft mit MSR

Im Magazin für Objektarchitektur und Sonnenschutz gibt Alfred Schelenz vom Architekturbüro Gatermann und Schössig eine Definition für den Begriff „intelligent“ [102]: „Für uns bedeutet „intelligent“ zunächst immer der Sonnenschutz, der sich für Gebäude, Standort,

Bedienbarkeit und die Nutzungsanforderungen am besten eignet. Sehr früh haben wir erkannt, dass der Sonnenschutz der auch am Wochenende und in arbeitsfreien Zeiten geregelt wird, den Energiehaushalt eines Gebäudes nachhaltig verbessert.“

Im Architekturbüro von Gatermann und Schossig sind in den letzten Jahren immer wieder innovative Fassadenentwicklungen entstanden. Besonderer Schwerpunkt stellt dabei die Integration des Sonnenschutzes dar.

5.2 (Best) Practice Beispiele

5.2.1 Capricornhaus (E.ON Energy Trading Building)

Das “Capricornhaus“ wurde vom Architekturbüro Gatermann und Schossig geplant. Die Fertigstellung erfolgte 2008.



Abbildung 5-1: Capricornhaus [103]

Die Besonderheit des Gebäudes liegt vor allem in der von den Architekten konzipierten i-modulFassade. Hierbei handelt es sich um ein multifunktionales Fassadenmodul, das die gesamte notwendige Technik beinhaltet, um das Raumklima individuell zu steuern. Es ist ausgestattet mit einem eigenen Lüftungssystem zum Kühlen, Heizen, Lüften und zur Wärmerückgewinnung. Außerdem sind in dem Fassadenpaneel Beleuchtungs-, Schallabsorptions- und Raumakustikelemente integriert.

Der Wegfall von Technikflächen durch das dezentrale Konzept bringt große Freiheitsgrade bei der inneren Gebäudeplanung mit sich. Zum Beispiel erlaubt die flexible Grundrissgestaltung die Realisierung verschiedenster Büroformen. Zusätzliche Merkmale des Gebäudes sind: Kompakte Bauweise, Betonkernaktivierung in Verbindung mit Kältegewinnung aus Grundwasser, moderne MSR Technik.

Die prognostizierten Energieeinsparungen für das Gebäude liegen bei 26% unter dem Wert der zum Zeitpunkt der Planung gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV 2004).

Das Capricornhaus wurde u. a. im Rahmen des Projektes DeAL - Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme messtechnisch untersucht (s. a. Abschnitt 5.1.3 bzw. [95] und [96]). Da die Daten anonymisiert sind, ist eine direkte Ergebniszuordnung nur begrenzt möglich. Zusätzlich problematisch ist, dass zum Zeitpunkt der Untersuchung das Gebäude leer stand.

5.2.2 Haus ohne Heizung

Ein Gebäude, das nahezu ohne Technik auskommt, stellt das 2013 fertiggestellte Haus “2226“ in Lustenau bei Bregenz (Österreich) dar (s. a. [104, 105]][106]). Das für eine gemischte Nutzung vorgesehene Gebäude hat keine Heizung und auch sonst keine aktive Klimatisierung. Diese erfolgt passiv über ein massives Ziegelmauerwerk mit Naturkalkputzfassade und geringem Öffnungsanteil sowie die interne Speichermasse. Personen und

Maschinen in den Räumen (Computer, etc..) werden als klimatisierende Elemente mit einbezogen. Ein ausgeklügeltes Mess- und Steuerungssystem regelt Temperatur und Luftströme. Es stellt durchs ganze Jahr den Komfort sicher.



Abbildung 5-2: Haus "2226", Fotos aus [104]

Eine zentrale Rolle bei der Klimatisierung spielt die thermische Speicherkapazität der Wände und Decken. 76 % davon entfallen auf die Geschossdecken, je 12 % auf die Außen- und Innenwände. Die Raumabschlüsse nehmen im Winter die Wärme der Nutzerinnen und Nutzer wie auch der Geräte auf und geben sie wieder ab. Im Sommer kühlen sie sich in der Nacht ab und senken die Temperatur während des Tages.

Die Lüftung erfolgt über vertikalen Öffnungsflügel, die jedes Fenster flankieren. Diese werden aufgrund der Sensormeldungen – also gemäß dem aktuellen Bedarf – durch die Steuerung aktiviert und erzeugen auf jeder Geschossebene eine Strömung, die sowohl die optimale Luftqualität als auch die gewünschte Temperatur sicherstellt.

Mittlerweile liegen die Betriebsdaten von zwei vollen Jahreszyklen vor. Nach Aussage der Architekten hat sich das errechnete Szenario bewahrheitet; das Hausklima bewegt sich innerhalb der angestrebten Komfortzone [104].

6 Simulation – Parameterstudie

Ziel der durchgeführten Parameterstudie ist es, den Einfluss innovativer Komponenten bzw. die üblicherweise damit verbundene Gebäudeautomatisierung auf den Raumkomfort und die Energieeffizienz zu ermitteln und zu quantifizieren.

Zur allgemeinen Vergleichbarkeit wird dazu ein typischer Büroraum generiert und mit unterschiedlichen Fenstern / Verschattungssystemen ausgestattet. Wesentlich sind hierbei sowohl die Art als auch die Aktivierung der Verschattung (manuell oder automatisch). Zusätzlich wird der Einfluss der Lüftungsstrategie untersucht, insbesondere wird der Einfluss der erhöhten Nachtlüftung geprüft.

Die bauphysikalischen Parameter für den Büroraum werden in Anlehnung an die ENEC 2014 für den Neubau / Nichtwohnungsbau gewählt. Es werden vier unterschiedliche Fensterflächenanteile (25 %, 50 %, 75 %, 100 %) berücksichtigt.

Basis für die Simulation stellt das Testreferenzjahr von 2011 [107] für den Standort Potsdam dar.

Für die untersuchten Varianten erfolgt jeweils die rechnerische Bestimmung des Jahresheiz- und Kühlkältebedarfs (bei einer Kühlung auf 23 °C) sowie die sich ohne Klimatisierung einstellenden Raumtemperaturen. Auswertegröße stellen hier die Überschreitungshäufigkeit nach DIN EN 15251 dar sowie die Übertemperaturgradstunden gemäß DIN 4108 Teil 2. Zusätzlich berücksichtigt werden zudem der Aufwand für Lüftung und Beleuchtung.

6.1 Randbedingungen Berechnung und Varianten

6.1.1 Berechnungsrandbedingungen

Folgende Randbedingungen liegen den Berechnungen zugrunde:

a) Simulationsumgebung

Die Berechnungen werden mit dem dynamischen Simulationsprogramm TRNSYS [108] durchgeführt.

b) Nutzungen/Nutzungszeiten

Es werden die Nutzungszeiten für Büronutzung gemäß DIN V 18599 angenommen: Montag - Freitag, jeweils in der Zeit von 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr.

c) Klimadaten für die Berechnungen

Den Berechnungen liegt das vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung zur Verfügung gestellte Testreferenzjahr von 2011 für den Standort Potsdam (Klimaregion B, TRY-Zone 4) zugrunde.

d) Beginn der Simulationsrechnungen und Zeitraum für die Auswertung

Die Berechnungen werden jeweils für ein komplettes Jahr durchgeführt und beginnen am 1. Januar an einem Montag um 0:00 Uhr. Es werden keine Feiertage und Ferienzeiten bei der Auswertung berücksichtigt.

e) Interne Wärmeeinträge

Der mittlere, interne Wärmeeintrag ist bezogen auf die Nettogrundfläche und wird zu 127,2 Wh/(m²d) angenommen. Die Wärmeeinträge setzen sich zusammen aus den Wärmeeinträgen elektrischer Geräte wie Computer und Drucker und den Wärmeeinträgen durch Personen. Bei den Wärmeeinträgen durch elektrische Geräte wird von einer mittleren Leistung von 3,5 W/m² je anwesender Person ausgegangen, die Wärmeabgabe durch

Personen wird zu 70 W je Person angenommen (s. a. Abbildung 6-1). Die Wärmeeinträge werden je zur Hälfte als konvektiv bzw. als Strahlungswärme angenommen.

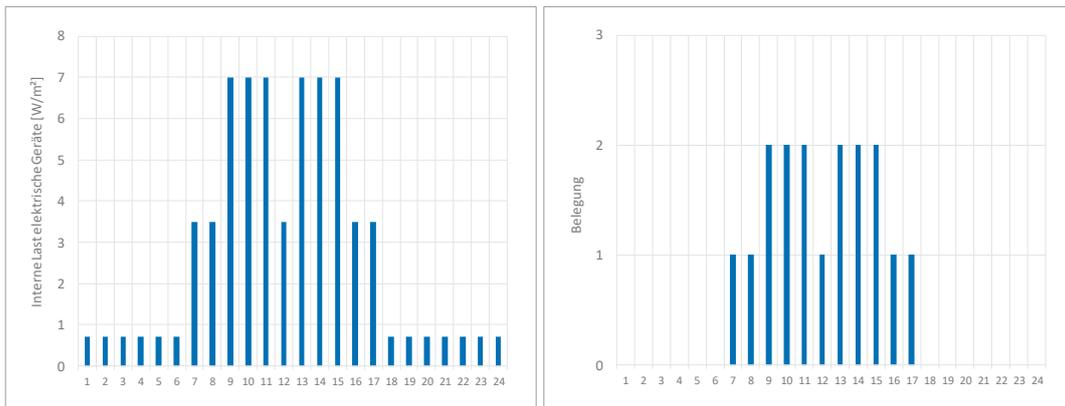


Abbildung 6-1: Tagesprofil interne Lasten – links: elektrische Geräte, rechts: Personenbelegung

f) Soll-Raumtemperatur für Heizzwecke

Die Soll-Raumtemperatur für Heizzwecke liegt innerhalb der Nutzungszeit des Büros (7:00 Uhr bis 18:00 Uhr) bei 21°C. In den Abend- und Nachtstunden und am Wochenende wird eine Nachtabsenkung auf 16 °C angenommen.

g) Soll-Raumtemperatur für Kühlzwecke

Die Soll-Raumtemperatur für Kühlzwecke liegt innerhalb der Nutzungszeit des Büros (7:00 Uhr bis 18:00 Uhr) bei 23°C. In den Abend- und Nachtstunden und am Wochenende wird grundsätzlich nicht gekühlt.

h) Grundluftwechsel

Während der Nutzungszeit (7:00 Uhr bis 18:00 Uhr) wird der Luftwechsel zu $n = 1,4 \text{ h}^{-1}$ angenommen, außerhalb der Nutzungszeit (18:00 Uhr bis 7:00 Uhr) beträgt der Luftwechsel grundsätzlich $n = 0,24 \text{ h}^{-1}$, es sein denn, dass ein erhöhter Nachtluftwechsel möglich und erwünscht ist und die entsprechenden Bedingungen gemäß i) dieses Abschnittes vorliegen.

Ist zur Raumauskühlung ein erhöhter Tagluftwechsel gewünscht, so müssen die Bedingungen für erhöhte Taglüftung gemäß j) dieses Abschnitts erfüllt werden.

Je nach untersuchter Variante der Luftwechsel über natürliche Fensterlüftung oder aber mechanisch erzeugt.

i) Nachtluftwechsel

Außerhalb der normalen Nutzungszeit (Nichtwohngebäude 18:00 Uhr bis 7:00 Uhr) wird für die Berechnungsfälle

- ohne Nachtlüftung von dem Luftwechsel von $0,24 \text{ h}^{-1}$ (s. a. Unterpunkt g)) ausgegangen
- mit erhöhter Nachtlüftung der Luftwechsel auf $n = 2 \text{ h}^{-1}$ erhöht.

Für den Ansatz des erhöhten Nachtluftwechsels müssen folgende Temperaturrandbedingungen gegeben sein:

$$T_{i,\text{Luft}} > T_{i,k,\text{soll}} \text{ und } T_{i,\text{Luft}} > T_e$$

mit:

$T_{i,\text{Luft}}$ Rauminnentemperatur

$T_{i,k,\text{soll}}$ Raum-Solltemperatur für Kühlzwecke, hier 23 °C

T_e Außentemperatur

Der erhöhte Nachtluftwechsel endet (in der Simulation), sobald die Raumtemperatur auf 21 °C abgesunken ist.

Für das System mit Kastenfenster, das nicht in Kombination mit einer kontrollierten Be- und Entlüftung betrieben wird, sondern über eine Kombination aus Parallel-Ausstell-Kippfenster verfügt, wird in Anlehnung an [109] mit Volumenströmen in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Außen und Innen gerechnet. Die angenommenen Luftwechsel sind in Tabelle 6-1 aufgeführt.

Tabelle 6-1: Luftwechsel beim Kastenfenster mit Parallel-Ausstell-Kipp-Funktion

Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{i, \text{Luft}} - T_e$	Luftwechsel
[K]	[1/h]
2	0,75
4	1,07
6	1,31
8	1,51
10	1,69

j) Erhöhter Tagluftwechsel

Überschreitet die Raumtemperatur 23 °C und liegt die Raumtemperatur über der Außentemperatur, wird der mittlere Luftwechsel während der Aufenthaltszeit (7:00 Uhr bis 18:00 Uhr) auf $n = 3 \text{ h}^{-1}$ erhöht, um hierdurch eine Überhitzung des Raumes zu vermeiden.

k) Regelung Sonnenschutz

Die Verschattung wird bei allen untersuchten Systemvarianten ausschließlich von April bis September aktiviert, in den Wintermonaten wird keine Verschattung vorgenommen.

Die Regelung des Sonnenschutzes erfolgt für die Mehrzahl der untersuchten Systemvarianten in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke auf die senkrechte Fassade. Es wird zwischen manueller und automatischer Regelung unterschieden. Für Fenstersysteme mit außenliegenden Jalousien bzw. im Scheibenzwischenraum befindlichen Jalousien sind die Schaltschwellen in Abhängigkeit der Fassadenausrichtung in Tabelle 6-2 dargestellt. In Tabelle 6-5 sind die Schaltschwellen für das Fenstersystem mit elektrochromer Verglasung aufgeführt.

Tabelle 6-2: Schaltschwellen Verschattung

Ausrichtung	Verschattung manuell	Verschattung automatisch
	[·]	[·]
Nord	$I > 150 \text{ W/m}^2$	$I > 100 \text{ W/m}^2$
Ost, Süd, West	$I > 200 \text{ W/m}^2$	$I > 100 \text{ W/m}^2$

In einer weiteren Variante wird die Verschattung in Abhängigkeit der Raumtemperatur untersucht. Hier erfolgt die Aktivierung der Verschattung sobald die Raumtemperatur 22 °C übersteigt. Die Verschattung wird beendet, wenn die Raumtemperatur auf 20 °C abgesunken ist.

l) Bauliche Verschattung

Eine bauliche Verschattung wird nicht in Ansatz gebracht.

m) Beleuchtung

Grundsätzlich wird von einer Beleuchtung von 6 W/m^2 zur Nutzungszeit des Büros ausgegangen. 60 % der Beleuchtungsleistung wird als Strahlungswärme an den Raum abgegeben, 40 % als konvektive Wärme.

Die Aktivierung der Beleuchtung erfolgt erst dann, wenn die Beleuchtung durch Tageslicht nicht ausreichend ist. Der Grenzwert zum Einschalten der Beleuchtung wird im vorliegenden Fall zu 500 Lux gewählt. Die Kontrolle der künstlichen Beleuchtung erfolgt im ON/ OFF – Modus, d. h. die Beleuchtung ist entweder zu 100 % eingeschaltet oder ganz aus, das Dimmen des Lichtes ist nicht möglich.

Bei nicht aktivierter Verschattung wird von einem Tageslichtfaktor von 3,0 ausgegangen, sind die Fenster verschattet, so wird der Tageslichtfaktor zu 0,1 angenommen.

6.1.2 Parameter der Modellrechnungen

a) Raummodell

Allen Berechnungen liegt ein Einraummodell in Anlehnung an die DIN EN ISO 13791 zugrunde (s. a. auch Abbildung 6-2). Die Grundfläche des Modells beträgt 20,3 m², das Raumvolumen 60,5 m³.

Der Modellraum ist so positioniert, dass er ausschließlich Wärmeverluste über die Fassade aufweist. Wärmeverluste über angrenzende Seitenwände, Decken bzw. Fußboden werden vernachlässigt, da hier von gleichen Raumtemperaturen ausgegangen wird. Nicht vernachlässigt wird dagegen die Kapazität der Seitenwände bzw. des Bodens und der Decke, da diese Elemente wichtige Funktionen der Wärmespeicherung übernehmen.

Der fassadenbezogene Fensterflächenanteil wird im Rahmen der Berechnungen zwischen 25 % und 100 % in Schritten von 25 % variiert.

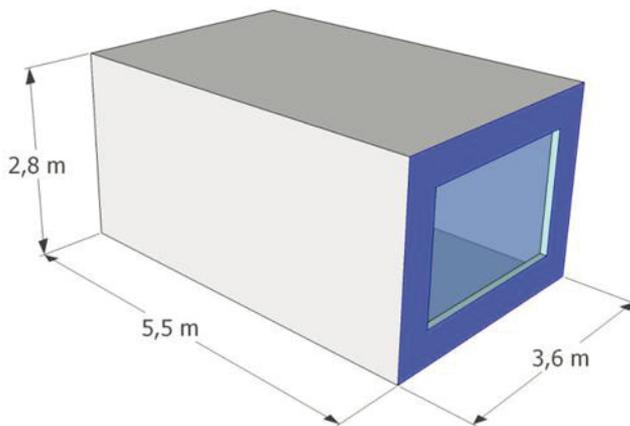


Abbildung 6-2: Geometrie des Einraummodells in Anlehnung an die DIN EN ISO 13791

b) Orientierungen

Die Berechnungen werden für die Orientierungen Nord, Ost, Süd und West durchgeführt.

c) Bauart und Wärmeschutzniveau

Das Wärmeschutzniveau des Modellgebäudes entspricht den Anforderungen der Energieeinsparverordnung von 2014 für den Nichtwohnungsbau / Neubau [110]. Eine Übersicht über die verwendeten Bauteilaufbauten bzw. bauphysikalischen Parameter gibt Tabelle 6-3.

Tabelle 6-3: Bauphysikalische Werte des Modellgebäudes

	U-Wert [W/(m ² K)]	Material Schicht	Schichtdicke [cm]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
Fassade	0,265	Gipsputz	1,0	0,25
		Normalbeton	24,0	2,3
		WDVS (Polystyrol)	12,0	0,035
		Kunstharzputz	2,0	0,7
Fußboden/ Decke	0,98	Parkett	2,5	0,2
		Zementestrich	8,5	1,4
		Trittschalldämmung	2,0	0,035
		Normalbeton	22,0	2,3
Zwischenwand leicht	0,418	Porenbetonstein	20,0	0,09
Zwischenwand schwer	3,892	Normalbeton	20,0	2,3

d) Fenster

Der grundsätzliche Scheibenaufbau ist für alle Fenstersysteme gleich. Es wird von einer 2-Scheiben-Isolierverglasung ausgegangen. Folgender Aufbau wird zugrunde gelegt, er wird im weiteren Verlauf auch als Referenzfenster bezeichnet:

- Außenliegende Scheibe: 4 mm Floatglas
- Scheibenzwischenraum: 16 mm gefüllt mit Luft-Argon-Gemisch (10 % / 90 %)
- Innenliegende Scheibe: 4 mm Isolierglas mit Low-E-Beschichtung

Die für die Simulation erforderlichen Kenndaten werden mit dem Programm WINDOW des Berkeley National Lab ermittelt [111] und in TRNSYS implementiert.

Für den Vergleich werden folgende Fenstersysteme verwendet (s. a. Tabelle 6-4):

- Referenzfenster mit 2-Scheiben-Verglasung mit $U = 1,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $g = 0,63$ in Verbindung mit einem außenliegenden Sonnenschutz ($F_c = 0,051$)
- Kastenfenster mit 2 x 2-Scheibenverglasungen mit $U = 0,53 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $g = 0,50$ in Verbindung mit einem außenliegenden Sonnenschutz ($F_c = 0,036$). Der Zwischenraum zwischen den Scheiben beträgt 120 mm.
- Elektrochromes Fenster mit 2-Scheibenverglasung mit $U = 1,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $g = 0,42 - 0,16$ ($F_c = 0,372$ (minimal))
- Referenzfenster mit 2-Scheiben-Verglasung mit $U = 1,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $g = 0,63$ in Verbindung mit einem zwischen den Scheiben liegenden Sonnenschutz ($F_c = 0,222$)

Tabelle 6-4: Kennwerte Fenster

	U_Glass [W/m ² K]	g-Wert [-]	Fc-Wert [-]
Referenzfenster mit außenliegender Verschattung	1,216	0,627	0,051
Kastenfenster mit außenliegender Verschattung	0,531	0,496	0,036
Fenster mit elektrochromer Verglasung	1,18	0,417	0,372
Fenster mit Verschattung zwischen der Verglasung	1,236	0,627	0,222

Für das mit elektrochromer Verglasung ausgestattete Fenster wird die zweite (raumseitige) Scheibe identisch zur zweiten Scheibe des Referenzfensters angenommen. Die erste Scheibe wird im Programm WINDOW so konfiguriert, dass sie in den einzelnen Schaltstufen der Verglasung von EControl in guter Näherung entspricht. Die Kenndaten und Schaltstufen sind in Tabelle 6-5 aufgeführt. Eine Regelung der Verschattung erfolgt in der vorliegenden Untersuchung in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke auf die Fassade.

Tabelle 6-5: Schaltstufen der EControl-Verglasung bei strahlungsabhängiger Regelung

Schaltstufe	g-Wert [-]	Fc-Wert [-]	Bedingungen Einstrahlung
0	0,417	1,000	$I \leq 100 \text{ W/m}^2$
1	0,351	0,842	$I \leq 125 \text{ W/m}^2$
2	0,286	0,686	$I \leq 150 \text{ W/m}^2$
3	0,221	0,530	$I \leq 175 \text{ W/m}^2$
4	0,155	0,372	$I > 175 \text{ W/m}^2$

6.1.3 Bewertungsparameter

Die Bewertung der Simulationsergebnisse erfolgt anhand von Komfortparameter und anhand des erforderlichen Nutzenergiebedarfs für Heizen und Kühlen bzw. für Lüftung und Licht. Die energetische Bewertung erfolgt bezogen auf den m² Nutzfläche, d. h. spezifisch.

Der Hilfsenergiebedarf für Raumheizung und Kühlung wird nicht berücksichtigt, da er zum einen (bei guter Anlagendimensionierung) im Verhältnis zum Verbrauch relativ niedrig ist, zum anderen aber auch für alle Systeme gleich oder zumindest sehr ähnlich ist.

Ebenso unberücksichtigt bleiben der Hilfsenergiebedarf zum Betrieb der Verschattung und der Gebäudeautomation, da diese Verbräuche bei guter Geräteauswahl ebenfalls sehr gering ausfallen und ohnehin problematisch zu simulieren sind.

a) Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2

In der DIN 4108-Teil 2 sind die Anforderungswerte für die Anzahl der zulässigen Übertemperaturgradstunden der operativen Raumtemperatur eines Raumes im Sommer festgelegt. Die Bezugswerte sind grundsätzlich abhängig von den sommerlichen Klimaverhältnissen und schwanken je nach Klimaregion zwischen 25 °C und 27 °C. Für den Standort Potsdam ist der Bezugswert mit 26 °C festgelegt.

Für Nichtwohngebäude liegt der Anforderungswert der Übertemperaturgradstunden bei 500 Kh/a, d. h. innerhalb eines Jahres darf die Anzahl der Übertemperaturgradstunden 500 Kh/a nicht übersteigen.

b) Zulässige Innenraumtemperaturen nach DIN EN 15251

In der DIN EN 15251 – Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – sind die empfohlenen Kriterien für das thermische Raumklima dargestellt.

Abbildung 6-3 zeigt exemplarisch die operative Raumtemperatur θ_o als Funktion des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur θ_{rm} . Es gibt drei Kategorien von Temperaturgrenzwerten. Die Grenzwerte sind nicht fest fixierte Werte, sondern abhängig von dem jeweiligen gleitenden Mittelwert der Außentemperatur. Kategorie I impliziert ein hohes Maß an Erwartungen an die Raumtemperatur. Diese Kategorie wird empfohlen bei Personen mit hoher Empfindlichkeit, z. B. ältere oder kranke Menschen oder Kinder. Bei der Kategorie II wird bei "normalen" Erwartungen empfohlen, z. B. für neue und sanierte Gebäude. Kategorie III greift bei einem moderaten Maß an Erwartungen.

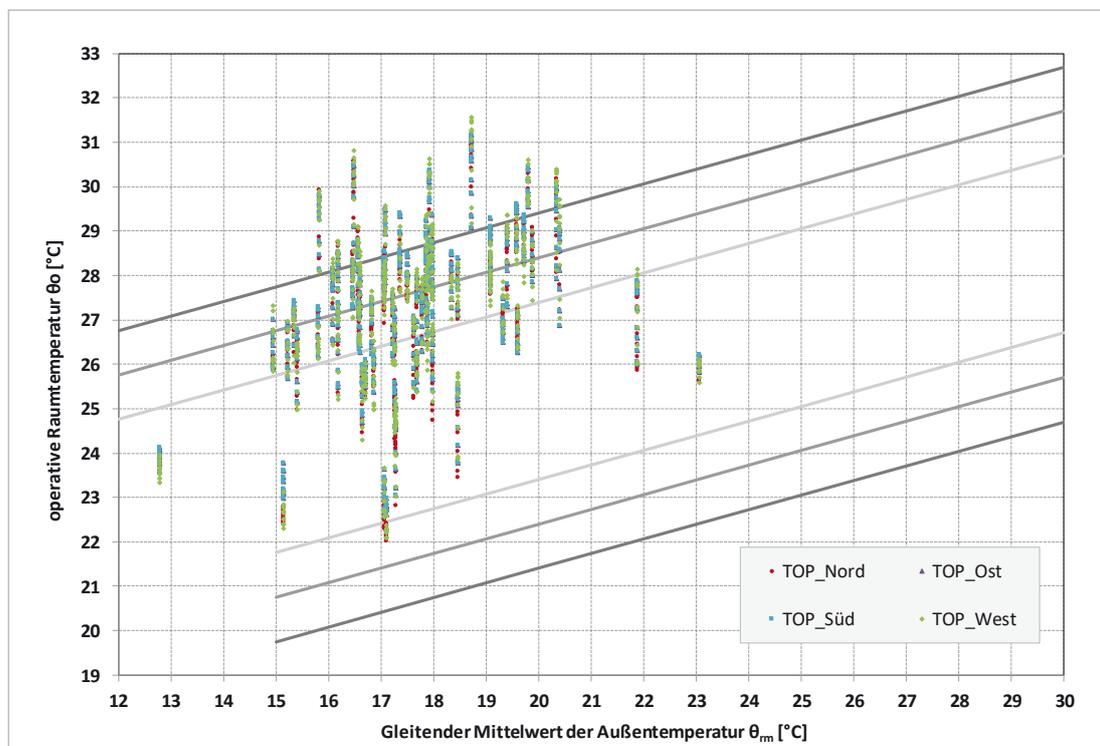


Abbildung 6-3: Operative Innentemperatur dargestellt als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur für ein System mit manueller Verschattung und erhöhter Taglüftung für einen Fensterflächenanteil von 50 %.

c) Energiebedarf Raumheizung

Die Beheizung der Räume erfolgt ideal, es wird der aufzuwendende Nutzenergiebedarf ausgewiesen. Übergabe- und Verteilverluste sowie der erforderliche Hilfsenergiebedarf werden nicht berücksichtigt.

d) Energiebedarf Raumkühlung

Die Kühlung der Räume erfolgt ideal, es wird der aufzuwendende Nutzenergiebedarf ausgewiesen. Übergabe- und Verteilverluste sowie der erforderliche Hilfsenergiebedarf werden nicht berücksichtigt.

e) Energiebedarf Lüftung

Der Energiebedarf für die Lüftung wird anhand der simulierten Laufzeit der Ventilatoren für die entsprechende Lüfterstufe (Taglüftung, Nachtlüftung minimal oder erhöhte Nachtlüftung) unter Berücksichtigung der jeweils erforderlichen Leistungsaufnahme ermittelt.

Die erforderliche elektrische Leistung des Lüftungsgerätes ist grundsätzlich abhängig vom Gesamtdruckverlust Δp_{tot} im Kanalnetz und im Lüftungsgerät, dem Volumenstroms V und dem Wirkungsgrad η des Ventilators. Nach DIN 18599 Teil 3 gilt für die elektrische Leistung eines Ventilators grundsätzlich:

$$P_{\text{vent,el}} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{\text{tot}}}{\eta_{\text{sys}}}$$

Der Druckverluste Δp_{tot} setzt sich aus den Druckverlustanteilen des Kanalnetzes Δp_{ext} und den Druckverlustanteilen Δp_{int} , die innerhalb des Lüftungsgerätes auftreten, zusammen. Der Druckverlust des Kanalnetzes Δp_{ext} besteht aus den Druckverlusten der Rohrstrecke selbst, den verbauten Formteilen (z. B. Abzweige, Bögen, Reduzierungen, etc.) und den Widerständen der im Kanalnetz verbauter Aggregate (z. B. Schalldämpfer, Blenden, etc.). Der externe Druckverlust des Kanalnetzes kann relativ einfach ermittelt werden, sobald das Kanalnetz dimensioniert und konstruiert ist. Der Druckverlust des Lüftungsgerätes Δp_{int} ist dagegen gerätespezifisch und umfasst alle im Gerät verbauten Teile (z. B. Wärmeübertrager, Filter, etc.). Angaben zum internen Druckverlust eines Lüftungsgerätes können in der Regel nur vom Hersteller gemacht werden, sie sind meistens nicht Bestandteil des technischen Datenblattes.

Zur überschlägigen Bestimmung der internen Druckverluste wird auf den sog. Druckverlustfaktor f_p zurückgegriffen, der das Verhältnis von externem zu internem Druckverlust wiedergibt. Nach DIN 18599 Teil 7 ist für Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung, Heizregister und Befeuchtungsvorrichtung ein Wert von 0,4 anzusetzen. Da in der vorliegenden Simulationsstudie von einer einfachen Lüftungsanlage ohne weitere Luftbehandlung ausgegangen wird, wird der Druckverlustfaktor zu 0,7 angenommen bzw. für die Systeme mit Wärmerückgewinnung zu 0,5:

$$f_p = \frac{\Delta p_{\text{ext}}}{\Delta p_{\text{tot}}} = \frac{\Delta p_{\text{ext}}}{\Delta p_{\text{ext}} + \Delta p_{\text{int}}} = 0,5 \text{ .. } 0,7$$

Daraus lässt sich der interne Druckverlust in Abhängigkeit des externen Druckverlustes ermitteln, so dass der Totaldruckverlust und die Leistungsaufnahme des Ventilators bestimmt werden kann.

Es wird jeweils der Druckverlust für den längsten Strang überschlägig ermittelt, dabei werden Zu- und Abluftstrang als identisch angenommen. Die zugrunde gelegten bzw. berechneten Werte sind in Tabelle 6-6 dargestellt. Die Werte gelten jeweils für *einen* Strang, d. h. Zuluft oder Abluft. Zur Ermittlung des elektrischen Gesamtaufwandes muss die Leistungsaufnahme des Ventilators doppelt berücksichtigt werden.

Tabelle 6-6: Volumenstrom, Druckverlust und elektrische Leistungsaufnahme Lüftungsgerät für einen Strang (Zuluft oder Abluft)

Lüftungsanlage ohne WRG (fp = 0,7)			Taglüftung	Nachtlüftung minimal	erhöhte Nachtlüftung
Luftvolumenstrom	V	[m³/h]	84	14,4	120
		[m³/s]	0,023	0,004	0,033
externer Druckverlust	dp_ex	[Pa]	100	50	150
interner Druckverlust	dp_int	[Pa]	42,86	21,43	64,29
Gesamtdruckverlust Kanalnetz	dp_tot	[Pa]	142,86	71,43	214,29
Wirkungsgrad Ventilator	eta_vent	[-]	0,5	0,5	0,5
Leistungsaufnahme Ventilator	Pel	[W]	13,33	1,14	28,57
Lüftungsanlage mit WRG (fp = 0,5)			Taglüftung	Nachtlüftung minimal	erhöhte Nachtlüftung
Luftvolumenstrom	V	[m³/h]	84	14,4	120
		[m³/s]	0,023	0,004	0,033
externer Druckverlust	dp_ex	[Pa]	100	50	150
interner Druckverlust	dp_int	[Pa]	100,00	50,00	150,00
Gesamtdruckverlust Kanalnetz	dp_tot	[Pa]	200,00	100,00	300,00
Wirkungsgrad Ventilator	eta_vent	[-]	0,5	0,5	0,5
Leistungsaufnahme Ventilator	Pel	[W]	18,67	1,60	40,00

Der Energiebedarf für die Lüftung wird anhand der Laufzeit der Ventilatoren für die entsprechende Lüfterstufe (Taglüftung, Nachtlüftung minimal oder erhöhte Nachtlüftung) unter Berücksichtigung der jeweils erforderlichen Leistungsaufnahme ermittelt.

f) Energiebedarf Beleuchtung

Es wird der Energiebedarf für die Beleuchtung simuliert und ausgegeben.

6.1.4 Variantenrechnungen

Insgesamt werden 10 verschiedene Kombinationen aus Fenster, Verschattung, Verschattungsaktivierung und Lüftung untersucht, die einzelnen Varianten sind detailliert in Tabelle 6-7 dargestellt.

Variante 0 stellt das Basissystem mit dem Referenzfenster ohne Verschattungseinrichtung und ohne Möglichkeit zur erhöhten Tag- bzw. Nachtlüftung dar.

Mit Ausnahme von Variante 0 wird jede Variante sowohl mit als auch ohne erhöhte Tag- oder Nachtlüftung bzw. mit und ohne (ideale) Kühlung simuliert. Jede Variante wird für die Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West untersucht. Bis auf das Kastenfenster werden alle Varianten für vier unterschiedliche Fensterflächenanteile (25 %, 50 %, 75 % und 100 %) gerechnet. Für das Kastenfenster werden nur drei Fensterflächenanteile simuliert (25 %, 50 % und 75 %). Im Folgenden werden die einzelnen Varianten kurz beschrieben.

In Variante 1 bis Variante 3 kommt das Referenzfenster mit einer außenliegenden Verschattung aber unterschiedlichen Verschattungsaktivierungen und Lüftungsstrategien zum Einsatz.

In Variante 1 werden Sonnenschutz und Lüftung manuell betrieben. In Hinblick auf den Sonnenschutz bedeutet das, dass dieser nur zur Büronutzungszeiten aktiviert werden kann. Außerhalb der üblichen Nutzungszeiten (z. B. nach Feierabend oder am Wochenende) ist eine Verschattung nicht möglich. Bei der manuellen Bedienung des Sonnenschutzes wird davon ausgegangen, dass im Vergleich zur automatischen Aktivierung der Sonnenschutz erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt heruntergefahren wird (s. a. Tabelle 6-2). Die in Variante 1 implementierte Lüftungsstrategie geht von manueller Lüftung aus, d. h. in den Sommermonaten ist kein erhöhter Nachtluftwechsel möglich, da aus Gründen des Versicherungsschutzes die Fenster nach Büroschluss geschlossen sein müssen. Es wird aber das Potenzial der erhöhten Taglüftung mit einem Luftwechsel von $LW = 3 \text{ h}^{-1}$ untersucht.

In Variante 2 werden Sonnenschutz und Lüftung automatisch betrieben. Im Vergleich zu Variante 1 bedeutet das, dass der Sonnenschutz jederzeit – vorausgesetzt die entsprechende Einstrahlungsschwelle ist überschritten – aktiviert wird. Die in Variante 2 umgesetzten Lüftungsstrategie geht von einer kontrollierten, mechanischen Lüftung aus, so dass in der

Sommerzeit ein erhöhter Nachtluftwechsel mit $LW = 2 \text{ h}^{-1}$ möglich ist. Der Tagluftwechsel wird mit $LW = 1,4 \text{ h}^{-1}$ als konstant angenommen.

Variante 3 unterscheidet sich von Variante 2 ausschließlich in der Art der Aktivierung des Sonnenschutzschutzes, hier wird der Sonnenschutz in Abhängigkeit der Raumtemperatur gesteuert.

Variante 4 entspricht grundsätzlich Variante 2 mit dem Unterschied, dass hier das elektrochrome Fenster zum Einsatz kommt, die implementierten Schaltschwellen zur Verdunkelung der Verglasung sind in Tabelle 6-5 aufgelistet.

In Variante 5 kommt ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung zum Einsatz. Die Variante entspricht grundsätzlich Variante 2.

In Variante 6 befindet sich die Verschattung - anders als in den Varianten 1 – 5 – nicht vor dem Fenster, sondern im Scheibenzwischenraum. Die Aktivierung des Sonnenschutzes erfolgt automatisch. Die Lüftung entspricht Variante 2.

In den Varianten 7, 8 und 9 sind Kastenfenster mit 2 x 2-Scheiben-Verglasungen implementiert. Die Verschattung wird außenliegend angenommen und automatisch aktiviert. Die Varianten unterscheiden sich ausschließlich hinsichtlich ihrer Lüftungsstrategie.

In Variante 7 wird davon ausgegangen, dass manuell über das Kastenfenster (Parallel-Ausstell-Kipp) gelüftet wird und eine erhöhte Nachtlüftung zulässig ist. In Variante 8 ist eine mechanische Be- und Entlüftung vorgesehen, in Variante 9 eine mechanische Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung. Die jeweilig implementierten Betriebsführungen entsprechen Variante 2 bzw. Variante 5.