

Potenzial von Künstlicher Intelligenz im Bereich von Gebäudehüllen

Michael A. Kraus^{1,2}, Michael Drass^{1,3}, Jens Schneider³

¹ M&M Network-Ing UG (haftungsbeschränkt), Lennebergstraße 40, 55124 Mainz, Deutschland

² ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), Stefano-Francini-Platz 5, 8093 Zürich, Schweiz

³ Technische Universität Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion, Franziska-Braun-Straße 3, 64289 Darmstadt, Deutschland

Abstract

In Zukunft werden beim Fassadenentwurf neben den Anforderungen an die Funktion als thermohygrische Barriere, dem Sonnenschutz und ansprechend-ästhetischem Design weitere Punkte zum Nutzerkomfort oder der -interaktion mit der Fassade im Fokus stehen. Dieser Beitrag zeigt auf, wie innovative adaptive Steuerungen der Fassade unter Verwendung von Künstlicher Intelligenz (KI) konzipiert werden, um die sich ergebende Mehrzieloptimierung zu bewältigen, indem Modelle der KI mit dem digitalen Zwilling der Fassade zu einem cyber-physikalischen Regelkreis mit Benutzer-Feedback verbunden werden. Am Beispiel der Fassade des sich im Bau befindlichen Glass Competence Center der TU Darmstadt wird ein derartiges Fassadensystem vorgestellt.

Applications and Potentials of Artificial Intelligence to Building Envelopes. Modern facades act as barrier against environmental influences but have to fulfill additional demands on functionality and appealing design. In future however, the design of facades will not only focus on the mentioned aspects but will have to account for user comfort and interaction with the facade. Hence, this article investigates the conceptual design of innovative adaptive control systems for facades using Artificial Intelligence (AI) in order to cope with the arising multi-objective optimization problem. Models of AI are combined with a digital twin of the facade to form a cyber-physical control loop with user feedback. Using the facade of the Glass Competence Center of the Technical University of Darmstadt as an example, such an intelligent and adaptive facade system is presented within this paper.

Schlagwörter: *Künstliche Intelligenz, nutzerzentrierte Fassade, Fassadensteuerung, Gebäudehülle*

Keywords: *Artificial Intelligence, user centered facade, facade control, building envelope*

Glasbau 2021. Herausgegeben von Bernhard Weller, Silke Tasche.

1 Einleitung

Die Gebäudehülle ist eine geometrisch-materielle Struktur, die mit all ihren Komponenten als Raumabschluss eine physische Trennung zwischen der äußeren Umgebung eines Gebäudes und seinem Inneren darstellt. Historisch war die Gebäudehülle zunächst Barriere gegen Niederschlag, Außenluft und -temperatur, Lärm und Sonneneinstrahlung. Die Installationen mechanischer Klimaanlage sowie ökologische Betrachtungen fügten zusätzlich den Aspekt der Gebäudeklimatisierung über die Fassade hinzu. Bei der Konzeption und Planung von Fassaden wird heutzutage nicht mehr nur der technischen Funktionalität und der Nutzerzufriedenheit große Aufmerksamkeit geschenkt, sondern auch einem möglichst ästhetischen Erscheinungsbild bei gleichzeitig innovativem Design der Fassade. Die Funktionalität einer Fassade lässt sich dabei über mehrere Kennwerte und Systematiken beschreiben. Heutzutage stellen insbesondere zweischalige Systeme schlanke und hochleistungsfähige Fassadentypologien dar, welche neben hoher technischer Qualität auch durch ihre Ästhetik und den architektonischen Charakter überzeugen. Die zunehmende Integration der Haustechnik erweitert den Funktionsumfang der Fassade um ihre klassischen Aufgaben [1]. Gerade die Multifunktionalität der Fassade ist ein herausfordernder Aspekt in der Planung, Ausführung und lebenszyklusbegleitenden Wartung und Pflege. Die in der Planung erwünschten Eigenschaften einer zweischaligen Fassade, welche im Rahmen dieses Beitrags ausschließlich betrachtet werden, bedingen sich großteils über Abhängigkeiten und wirken teilweise sogar konträr gegeneinander. Somit kann eine Leistungssteigerung sowie ein Mehr an Funktionalitäten der Gebäudehülle nicht einfach durch das Hinzufügen weiterer Funktionalitäten erreicht werden. Dies ist insbesondere bedeutsam für den sich aktuell anbahnenden Trend zu nutzerzentrierten Gebäudehüllen, welche eine Interaktion der Fassade mit dem Gebäudenutzer vorsehen, sodass dessen Wohlbefinden, Produktivität und Gesundheit gesteigert werden kann. Somit bedarf es vielmehr einer harmonischen Abstimmung der einzelnen Komponenten und Anforderungen der Fassaden- und Haustechnik in Interaktion mit den Nutzern, sodass einerseits die Fassade zur Einhaltung ökonomischer und ökologischer Randbedingungen möglichst automatisch und intelligent gesteuert werden kann. Andererseits soll aber auch das Wohlbefinden der sich in dem Gebäude befindlichen Personen maximiert werden.

Dieser Beitrag greift den Forschungsansatz von Böke [2], [3] der technischen Umsetzung von Fassaden als cyber-physikalische Systeme (vgl. Abs. 3.2) auf und erweitert diesen konzeptionell um die intelligente Steuerung und Regelung mit Künstlicher Intelligenz (KI, vgl. Abs. 3.1), wobei ein besonderer Fokus auf die Nutzerinteraktion bzw. das Nutzerfeedback gelegt wird. Er entwickelte dabei einen Doppelfassaden-Prototyp, der in einzelne Module unterteilt ist, die jeweils eine der ausgewählten Fassadenfunktionen repräsentieren: Sonnenschutz, natürliche und mechanische Lüftung sowie Heizung und Kühlung. [3] entwickelte ein Kommunikationssystem zwischen den einzelnen Modulen und untersuchte deren Zusammenspiel. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Konzept zur KI-basierten Steuerung und Regelung des zweischaligen Fassadensystems der Firma IconicSkin GmbH als cyber-physikalisches System unter spezifischer Betrachtung der Nutzerinteraktion behandelt. Mithilfe von KI-Modellen und Algorithmen sowie der Ausstattung der Fassade mit Sensoren und Aktoren soll die Fassade als cyber-

physikalisches System interpretiert werden. Die Kommunikation der einzelnen von Böke [2] und [3] vorgestellten Module wird so evaluiert, bewertet und gesteuert, dass ein möglichst großer Nutzerkomfort bei gleichzeitiger Minimierung der Betriebskosten und Umweltbelastungen entstehen soll. Weil bei diesem so genannten *Pareto*-Problem konkurrierende Effekte in der Fassade im Rahmen der Steuerung und Regelung zu erwarten sind, bietet sich der Einsatz von KI-Algorithmen zur Steuerung an, da diese sehr komplexe Muster erkennen und optimieren können, welche sich einer klassischen Programmierung entziehen. Der vorliegende Beitrag stellt somit erstmalig die konzeptionelle Idee eines KI-basierten Steuer- und Regelkreises einer cyber-physikalischen Fassade mit Fokus auf das Produkt ISOshade® vor.

2 Doppelfassaden

Doppelfassaden können in verschiedenen Ausführungsformen entwickelt werden, die Hauptvarianten definieren sich dabei bezüglich der Konzepte zur Trennung des Zwischenraums und innerer Ebene. Die Konzepte unterscheiden sich in einem druckabhängigen Austausch von Innen- und Hohlraumluft (Austauschsysteme), einem Austrag der Innenluft in den Hohlraum (Absaugsysteme) und einer vollständigen Trennung der Luftströme (Puffersysteme). Die Luftströme innerhalb der verschiedenen Trennkonzepte werden entweder mechanisch oder natürlich erzwungen, vgl. Bild 1.

Close-Cavity-Facade (CCF) Fassadenlösungen stehen aufgrund der verwendeten getrockneten Luft und der Wechselwirkungen zwischen Kunststoffmaterialien und Glasbeschlägen vor besonderen Herausforderungen hinsichtlich der Materialverträglichkeit. Dies macht die Selbstkonditionierung aufwendig und teuer, da sehr hochwertige und geprüfte Komponenten verwendet werden müssen. Zudem ist der Planungsaufwand für die mechanischen Systeme komplex und erfordert ein hohes Maß an Detailabstimmung. Die vereinheitlichten Glaselemente müssen ebenfalls in Reinräumen her-

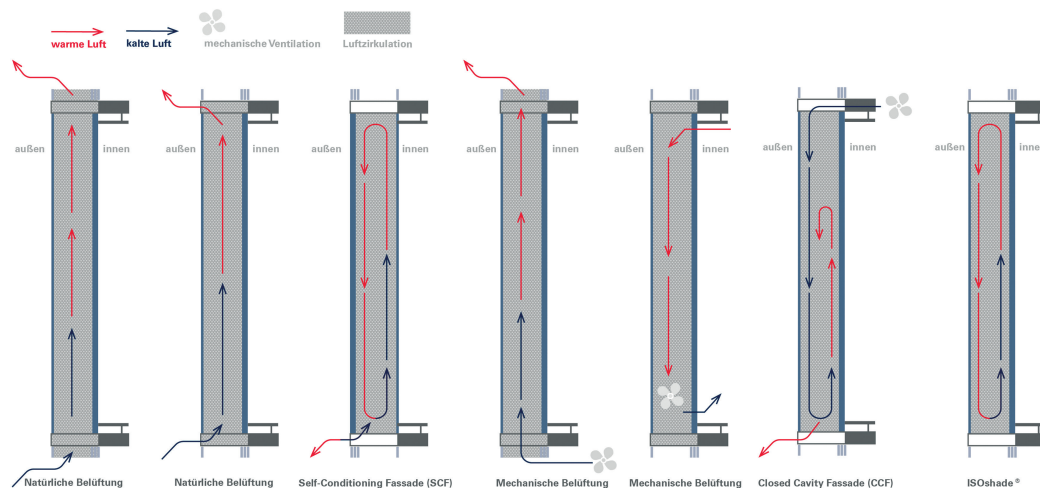


Bild 1 Verschiedene Varianten von Doppelfassaden mit entsprechenden Luftführungssystemen [1]

gestellt werden und erfordern eine Konditionierung über die gesamte Verarbeitungs- und Lieferkette. Eine weitere Schwierigkeit für eine CCF liegt in der Umsetzung eines integrierten Sonnenschutzes. Um die vorgenannten Herausforderungen zu lösen, wurde das System ISOshade® entwickelt.

Das Konzept von ISOshade® basiert auf einem hermetisch verschlossenen Hohlraum, der in einem Reinraum hergestellt wird. Ein spezielles Druckausgleichssystem hält die zulässigen Klimalasten (Druck, Elevation) im Hohlraum aufrecht. Dieses System stellt sicher, dass bei Temperaturschwankungen der Druck im Hohlraum auf einem konstanten und akzeptablen Niveau gehalten wird. Zum weiteren Schutz vor Kondensation sind die Abstandshalter mit einem Trockenmittel gefüllt. Der Hohlraum konditioniert sich über ein volumenabhängiges System. Das in den Hohlraum integrierte Sonnenschutzsystem spart gegenüber konventionellen Fassadensystemen Platz und leitet Wärme, Licht und Energie in das Gebäude, um im Sommer die Wärme außen und im Winter die Wärme innen zu halten. Die größte Herausforderung bei allen zweischaligen Fassaden ist der Umgang mit Temperatur und Feuchtigkeit im Hohlraum. Klimatische Einwirkungen aus Luftdruckunterschieden und Feuchteintrag müssen reguliert werden, um keine Schäden z. B. an Glas und Randverbund zu verursachen und Kondensation auf Oberflächen zu verhindern. Darüber hinaus müssen alle verwendeten Materialien, z. B. Sonnenschutzsysteme, den Klimalasten im Zwischenraum standhalten, um die Haltbarkeit und Transparenz der Fassade zu gewährleisten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Adaptivität bei Doppelfassaden zwar ein Schlüsselement darstellt, bisher jedoch hauptsächlich unter thermischen und optischen Gesichtspunkten zur Wahrung des Nutzerkomforts bzw. des Gebäudeenergieverbrauchs durch bestimmte Bauprinzipien entwickelt wurde. Durch die Einführung steuerbarer Aktoren, wie z. B. Sonnenschutzsysteme oder schaltbare, sich öffnende oder schließende Lufteinlässe oder die Aktivierung von Umluftgeräten und des Heizsystems, wird das Verhalten der Fassade verändert und ermöglicht eine aktive Steuerung durch den Gebäudenutzer. Da sich dieses steuerbare Gebäudehüllensystem an verschiedenen Orten mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen befinden kann, wird eine statische (vorab vorgenommene) Programmierung einer Steuer- und Regelungssoftware höchstwahrscheinlich fehlschlagen, da die Funktionalität der zweischaligen Fassaden stark von den äußeren lokalen Bedingungen (Sonneneinstrahlung, Außentemperatur, Konvektion, Lage und Ausrichtung des Gebäudes usw.) abhängig sind und somit den Komfort der Benutzer im Gebäudeinneren direkt beeinflussen. Wird nun die Gebäudehülle durch Sensoren und Aktoren mit adaptiver Steuerung ergänzt, so ist es möglich, das komplexe Problem durch Anwendung künstlicher Intelligenz, auch in Abhängigkeit des Nutzerfeedbacks in technischer, ökonomischer und ökologischer Hinsicht dynamisch (zeitlich variabel) zu steuern und zu regeln.

Als Pilotprojektbeispiel für eine solche KI-gesteuerte Fassade soll am Glass Competence Center der TU Darmstadt eine ISOshade® Fassade installiert werden. Das Glass Competence Center (GCC) wurde 2018 an der TU Darmstadt gegründet, um neue Technologien des Glasbaus wissenschaftlich zu untersuchen. Nutzer sind das Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D) und die Materialprüfungsanstalt (MPA) der TU Darmstadt. Am GCC der TU Darmstadt arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an aktuellen Forschungsthemen im Bereich der Glastechnologie. Darüber hinaus verfügt der GCC über ein Labor, in dem typische Prozesse der Glasveredelung wie Waschen, Schneiden, Bohren, thermisches Vorspannen und Laminieren durchge-

führt werden können. Das neue Laborgebäude hat eine Grundfläche von $16,0 \times 30,0$ m. Die Fassade wird insbesondere mit Sandwichpaneelen und – als Lichtband im Sockelbereich – mit dem ISOshade®-Fassadensystem ausgestattet. Ziel ist es, die elementierte Fassade im Rahmen einer Forschungsk Kooperation zu installieren, zu betreiben und zu untersuchen.

3 Einbindung Künstlicher Intelligenz in den Lebenszyklus von Doppelfassaden

Die Technologie der „Künstlichen Intelligenz“ (KI) begegnet uns heutzutage in vielfältiger Weise bereits im Alltag in Form von Spam-Filtern oder digitalen Assistenten. Die KI löst zudem vielfältige Diskussionen in Unternehmen der Tech-Industrie, Universitäten und Start-ups, aber auch in Low-Tech-Unternehmen mit einem geringen Digitalisierungsgrad aus. Die sich schnell entwickelnde Technologie hält inzwischen in fast allen Branchen weltweit Einzug, führende Institutionen aus Wissenschaft und Wirtschaft versprechen sich eine neue technische Revolution in der Technologiebranche aber auch in sozialen, rechtlichen, medizinischen und anderen Disziplinen. Betrachtet man die Bauindustrie, so hat dieser Sektor bisher die niedrigste Digitalisierungsrate [4] und kann durch KI eine bedeutende Entwicklung erfahren.

3.1 Grundlagen zu Künstlicher Intelligenz, Machine und Deep Learning

Der informationswissenschaftlichen Definition folgend, umfasst die KI alle Systeme, die ihre Umgebung wahrnehmen und Maßnahmen ergreifen, sodass die Chance auf das erfolgreiche Erreichen von Zielen maximiert wird [5]. Der Begriff „KI“ spiegelt somit wider, dass eine Rechenmaschine bzw. ein Algorithmus kognitive Fähigkeiten des Menschen wie Lernen und Problemlösen nachahmt. Umgangssprachlich werden die Begriffe der KI, des Machine Learning (ML) sowie des Deep Learning (DL) häufig als Synonym verwendet, wobei es sich streng genommen beim ML und DL um spezifische Unterarten der KI handelt, die unterschieden werden müssen.

Maschinelles Lernen (ML) ist eine Unterklasse der KI, die es Systemen ermöglicht, aus gegebenen Daten zu lernen und nicht durch explizite Programmierung Aktionen, Befehle oder Entscheidungen auszuführen oder zu treffen. Das Ziel von ML ist es, künstliches Wissen aus Erfahrung (den Daten) zu generieren. Eine Grundprämisse ist jedoch, dass das aus den Daten gewonnene Wissen verallgemeinert und für neue Problemlösungen, für die Analyse bisher unbekannter Daten oder für Vorhersagen auf nicht gemessenen Daten (Vorhersage) verwendet werden kann [6], [7]. Typische Beispiele für klassisches ML sind: lineare Klassifikation (z. B. lineare / logistische Regression, lineare Diskriminanzanalyse), Kernel-Methoden (z. B. Support-Vektor-Maschinen), baumbasierte Methoden (z. B. Entscheidungsbäume, Zufallswälder), nichtparametrische Regression (z. B. nächste Nachbarn, lokale Kernel-Glättung), etc.

Deep Neural Networks (DNN) oder Deep Learning (DL) verwendet sogenannte künstliche neuronale Netze, um Muster und hochgradig nichtlineare Beziehungen in Daten zu erkennen. Ein tiefes neuronales Netz (DNN) basiert auf einer Ansammlung von miteinander verbundenen Knoten (Neuronen), die von ihrer Funktionalität den

Neuronen des menschlichen Gehirns ähneln. Aufgrund ihrer Fähigkeit, nichtlineare Prozesse zu reproduzieren und zu modellieren, haben tiefe neuronale Netze in vielen Bereichen Anwendung gefunden [8]. Dazu gehören Materialmodellierung und -entwicklung, Systemidentifizierung und -steuerung (Fahrzeugsteuerung, Prozesssteuerung), Mustererkennung (Radarsysteme, Gesichtserkennung, Signalklassifizierung, 3D-Rekonstruktion, Objekterkennung und mehr), Sequenzerkennung (Gesten-, Sprach-, Handschriften- und Texterkennung), medizinische Diagnostik, Filterung sozialer Netzwerke und E-Mail-Spamfilter.

Es wird deutlich, dass KI der Oberbegriff für alle Entwicklungen auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz ist. Maschinelles Lernen ist eine Unterkategorie der KI, die sich mit überwachten und unüberwachten Lernproblemen befasst, um Muster in Daten zu beschreiben. Deep Learning ist eine spezifische Untergruppe der KI und hat starke Schnittmengen mit ML, konzentriert sich aber ausschließlich auf die Anwendung von (tiefen) neuronalen Netzen auf Daten. Für die Steuerung und Regelung in Fassadenanwendung werden sowohl ML als auch DL Modelle und Algorithmen zur Anwendung kommen. Aufgrund der gegebenen Kürze dieses Beitrags wird bzgl. der Details zu ML und DL auf [5], [7], [8] verwiesen.

3.2 KI-basiertes Steuerungs-System cyber-physikalischer Fassaden

Unter einem cyber-physischen System sind mechanische Komponenten, welche über Netzwerke und moderne Informationstechnik miteinander verbunden sind, zu verstehen [7], [9]. Somit wird eine Steuerung, Regelung und Überwachung komplexer technischer Systeme ermöglicht. Somit ist das Konzept einer cyber-physischen Fassade umfassender als das einer klassischen steuerbaren Fassade. Nach der Idee von Böke [2], [3] besteht eine „intelligente Fassade“ aus einzelnen Modulen, die jeweils eine spezielle Funktion in der Fassade übernehmen. Für das Beispiel der ISOshade®-Fassade sind die Einzelmodule das adaptive Sonnenschutzmodul. Weitere Module innerhalb einer cyber-physikalischen Fassade stellen Systeme zur natürlichen und mechanischen Belüftung, Heizung und Kühlung dar, die jedoch nicht Teil der vorliegenden Studien sind, da sie im analysierten Produkt nicht enthalten sind. Dennoch soll im Folgenden gezeigt werden, wie die adaptive cyber-physikalische Fassade mit dem Menschen interagiert und insbesondere wie ein KI-basiertes Steuerungssystem den Nutzerkomfort maximieren kann. Die Idee wurde von der Start-Up M&M Network-Ing UG entwickelt und bereits mehrfach veröffentlicht [7], [9].

Aus regelungstechnischen Betrachtungen sind für das hier beschriebene Problem insgesamt drei Gleichungen notwendig: eine Maschinen-, eine Steuer- und eine Regleichung. Diese drei Gleichungen können beim Vorliegen eines bekannten Systems (wie einer adaptiven Fassade mit Geräten zur Erfassung des Nutzerfeedbacks) in einer einzigen Verlustfunktion J formuliert werden. Eine Verlustfunktion beschreibt dabei die mathematische Struktur des Problems und welche Distanz ein Systemzustand zu einem optimalen Zustand besitzt. Sie wird verwendet, um über geeignete Optimierungsalgorithmen ein Minimum für jeden Zeitpunkt des Systems zu ermitteln. Weitere Hintergründe zur Theorie und praktischen Umsetzung einer KI-Einbindung in den Steuer- und Regelkreis mit einstellbaren Systemgrößen θ sind in [10] zu finden. Zum Verständnis wird die Verlustfunktion J in Abhängigkeit der Zeit τ zur Regelung und Steuerung einer cyber-physischen Fassade allerdings schematisch formuliert:

Totalverlust = {technischer + ökonomischer + ökologischer} Verlust + Sensorrauschen + Nutzerunschärfe

$$J(t) = \int_0^t (T(\tau|\theta) + \text{Ökn}(\tau|\theta) + \text{Ökl}(\tau|\theta)) d\tau + \varepsilon + v(t) \quad (1)$$

Bauphysikalische Grundlagen und Zusammenhänge zwischen der Beschreibung der Behaglichkeit sowie des Nutzerkomforts durch äußere Einflüsse und deren Manipulation, z. B. durch die Steuerung von Lichtlenk- oder Heizungssystemen, sind prinzipiell in der Fachwelt weitgehend verstanden (in Gl. (1) benannt als „technischer Verlust“ $T(\tau|\theta)$), obwohl sie bisher in keinem Ansatz zum „Smart Home“ in Form eines Regel- und Steuerkreises berücksichtigt wurden. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass (analog zum „Internet der Dinge“) sich der Maschinenbau im Allgemeinen bisher mit der Vernetzung bzw. Kombination von Maschinen und Geräten befasst hat, ohne das bautechnikspezifische Wissen über die Interaktion zwischen Mensch und Gebäude zu integrieren. Eine Herausforderung in der Einbeziehung zur Beschreibung des Nutzers liegt in dessen statistischer Natur, d. h. Behaglichkeit und Wohlbefinden können „nur“ auf Verteilungen (ggf. bedingt bzgl. Geschlecht, Alter, etc.) genau bestimmt werden [11]. Dies induziert einen probabilistischen Steuerungs-Regelungs-Prozess, welcher aber mithilfe der KI ebenfalls behandelt werden kann (in Gl. (1) benannt als „Nutzerunschärfe“ $v(t)$). Die Messunsicherheiten aus den Sensoren und Aktuatoren werden in einem Zufallsvektor ε zusammengefasst modelliert.

Die „digitalen Zwillinge“ (cyber-physikalische Repräsentationen) von Gebäuden, Gebäudetechnik und adaptiven Fassadenelementen sind für die grundsätzliche Anwendbarkeit einer KI unerlässlich, denn eine KI kann ein System nur durch die Analyse und Steuerung von Datenströmen erlernen und steuern bzw. regeln. Hier kann eine KI um bauphysikalische Kriterien erweitert werden und das Nutzerfeedback so auswerten, dass ein Gebäude (Wohnraum/Arbeitsplatz) über die vielfältigen Datenströme die Präferenzen des jeweiligen Nutzers über die Zeit lernt und sich an diese anpasst. Diese Idee geht weit über die derzeit existierenden Ansätze zum „Smart Home“ hinaus, sodass eine konzeptionelle Abgrenzung des „intelligenten Haus/Büro“ sinnvoll ist. Das Prinzip lautet hier: Das Gebäude lernt seinen Nutzer kennen.

Zur Realisierung der Projektidee einer KI-basierten Steuerung für cyber-physikalische Fassaden werden bauphysikalisch relevante meteorologische Daten am Fassadenelement durch Sensoren und die zunächst menschenbasierte Anpassung von Sonnenschutzsystemen durch manuelle Verstellung über die Zeit verfolgt und aufgezeichnet. Zusätzlich ist eine Analyse der Behaglichkeit und des Wohlbefindens der einzelnen Nutzer, die sich im Gebäude oder an einem Arbeitsplatz befinden, erforderlich. Zu diesem Zweck können *smart watches* eingesetzt werden, welche Blutdruck, Puls, Körpertemperatur bis hin zu den Standortkoordinaten (wo sich die Person im Gebäude befindet) messen. Ziel ist die Erstellung eines geeignet repräsentativen Datensatzes, der die bauphysikalischen Messdaten und den Energieverbrauch des Gebäudes als Merkmale enthält. Weitere Merkmale, mit denen eine KI trainiert werden kann, sind die Komfortdaten, die mithilfe von Smart Watches an Menschen gesammelt werden. Diese so genannten Features dienen als Grundlage für das Training der KI und sind implizit die Stellglieder für eine KI-basierte, intelligente Steuerung der Fassade, die sowohl auf der Ökologie des Gebäudes als auch auf dem Wohlbefinden der Nutzer basiert. Ein schematisches Flussdiagramm ist in Bild 2 dargestellt.

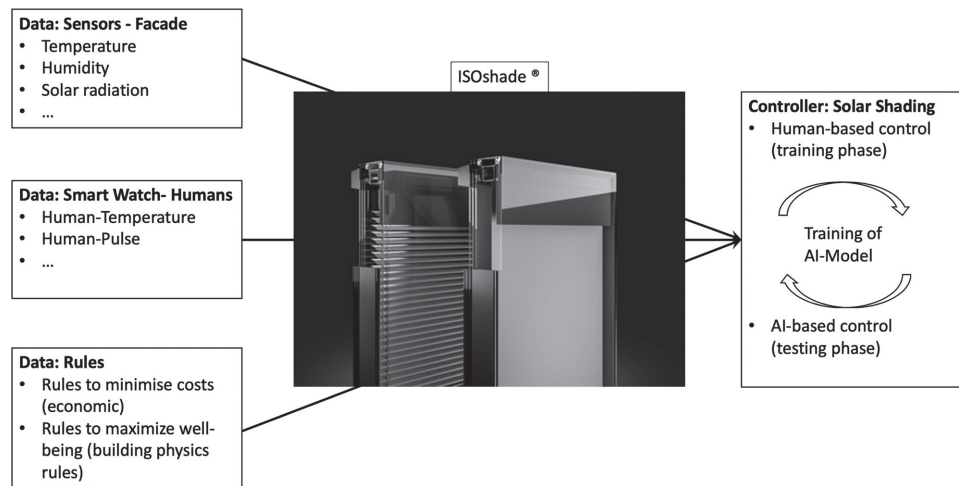


Bild 2 Flowchart einer KI-gesteuerten cyber-physikalischen Fassade bestehend aus einer Datenerfassung als Input, der Trainingsphase inkl. Nutzerinteraktion, Training der KI-Modelle und der Testphase der KI-Steuerung

Da es für eine intelligente KI-basierte Steuerung nicht ausreicht, nur technisch-physikalische Merkmale über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr einzubeziehen, muss für die spätere adaptive Steuerung des Fassadenelements die individuelle Einstellung des Sonnenschutzes als Ausgangsgröße nachgeführt werden. Zu diesem Zweck müssen Langzeitdaten für verschiedene Personen, die sich wiederholt im GCC aufhalten oder dort ihren Arbeitsplatz haben, gemessen werden, um individuelle Präferenzen und damit verbundene Muster zu erfassen. Kurzzeitbesuchern wird keine Möglichkeit zum aktiven Feedback an die KI im Rahmen dieser Studie eingeräumt. Im Laufe des Projektes kann dann abgeschätzt werden, wann die Datenmenge groß genug ist, sodass die KI-Algorithmen auf der Grundlage dieser Daten erfolgreich Korrelationen ableiten, um intelligente Vorhersagen von Aktionen für die Fassade zu ermöglichen, um die Nachhaltigkeit des Gebäudes sowie das Wohlbefinden der Nutzer darin zu maximieren. Das vorher beschriebene Konzept ist in Bild 3 grafisch dargestellt.

Wie in Bild 3 ersichtlich ist, wird die Fassade mit Sensoren zur Messung von z. B. Licht, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung usw. ausgestattet. Darüber hinaus ist die cyber-physikalische Fassade mit ihren Aktoren (an den Modulen) in der Lage, die Lichtrichtung adaptiv zu beeinflussen und Rollläden zu steuern. Im Inneren des Gebäudes befinden sich Mitarbeiter, die jeweils mit intelligenten Uhren ausgestattet sind, um eine Kopplung zwischen den Sensoren der Fassade und den Sensoren an den Personen über deren Feedback zu erreichen. Um eine KI-basierte Steuerung der cyber-physikalischen Fassade mit der Maximierung des Wohlbefindens des Menschen zu ermöglichen, müssen alle relevanten Merkmale (Sensoren außen und menschliche Sensoren innen) in die sogenannte Trainingsphase integriert werden. Weiterhin ist das aktiv gesteuerte Verhalten des Menschen im Hinblick auf die Steuerung der adaptiven Fassade zu erfassen. Die aktive Steuerung der Fassade ist dementsprechend das sogenannte Label. Es ist das Ergebnis der aktiven Steuerung bzw. Veränderung der Fassade durch die KI-Einheit anhand der gemessenen Merkmale oder des Nutzers.

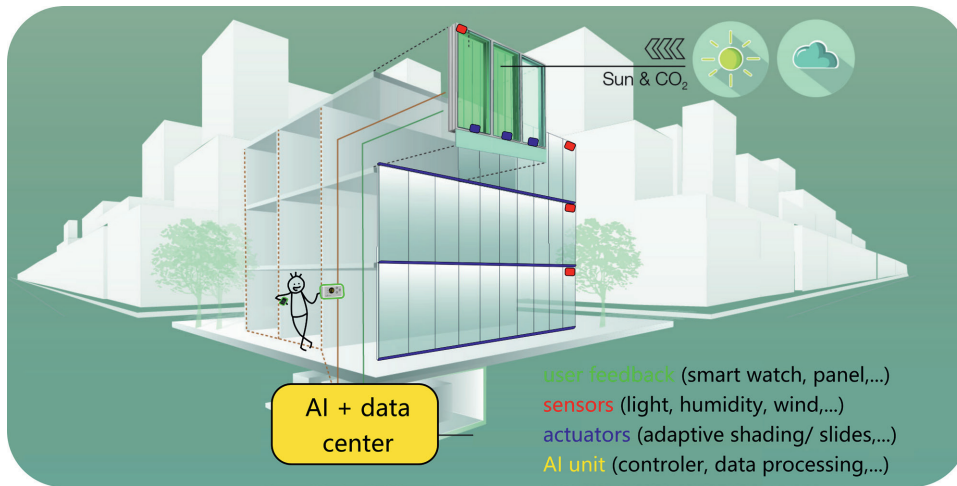


Bild 3 Schematische Darstellung einer cyber-physikalischen Fassade mit Interaktion von Nutzer und KI-Kontrollzentrum

Die aktive Trainingsphase dauert voraussichtlich mindestens drei Jahre, um das Verhalten und die Interaktion von menschlicher und cyber-physikalischer Fassade über die einzelnen Jahreszeiten hinweg statistisch signifikant zu messen. Die tatsächliche Dauer der Messung ergibt sich im Verlauf der Projekts aus der Ergodizität und Stationarität der aufgezeichneten Signale, daraus kann dann abgeleitet werden, ab wann genügend Trainingsdaten zur Verfügung stehen. Liegt dies vor, so wird ein KI-Modell entwickelt, das die Korrelationen Sensor-Label sowie Mensch-Label ermöglicht.

Darüber hinaus ist geplant, eine Korrelation mit den bauphysikalischen Wetterdaten am Fassadenelement und den Komfortdaten, die direkt am Menschen erhoben werden, herzustellen. Hier ist es interessant zu erfahren, inwieweit die von außen gemessenen Wetterdaten mit dem tatsächlich empfundenen Komfort der Personen korreliert werden können. Eine weitere interessante Frage ergibt sich daraus, wie sich ein einzelner Nutzer im Vergleich zum Aufenthalt vieler Nutzer innerhalb des Gebäudes verhält und wie eine KI hier zwischen einem gemeinsamen Wohlbefinden und dem individuellen Wohlbefinden entscheidet.

4 Zusammenfassung, Resümee und Ausblick

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit sogenannten cyber-physikalischen Fassaden und deren Steuerung bzw. Regelung mithilfe eines Ansatzes zur Verknüpfung des digitalen Zwillings der Fassade und Künstlicher Intelligenz. Somit wird neben den technisch-ökonomisch-ökologischen Anforderungen des Status Quo der künftigen Entwicklung der Nutzerzentriertheit eines Gebäudes intelligent Rechnung getragen.

Ziel des vorliegenden Aufsatzes war es, eine grundlegende Methodik zur Planung und Umsetzung eines solchen Systems aufzuzeigen. Zunächst galt es, die Formulierung der Optimierungsfunktion aus den Komponenten gegenläufiger technisch-ökono-

misch-ökologischer Ziele sowie dem Nutzerfeedback zu entwickeln. Eine Hauptherausforderung hierbei ist die Einbeziehung des lediglich statistisch erfassbaren Verhaltens der Gebäudenutzer sowie deren Präferenzen. Im nächsten Schritt wurde aufgezeigt, wie mithilfe von Messsensoren an der Fassade und den Nutzern des Gebäudes ein KI-basierter Controller zur Steuerung der cyber-physikalische Fassade über Aktoren trainiert werden kann. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Untersuchung der Ergodizität und Stationarität der aufgezeichneten Sensor- und Aktuatorsignale sowie das Nutzerfeedback. Diese beiden Eigenschaften bestimmen maßgeblich die Aufzeichnungs- und Trainingsdauer dieses Projekts und entscheiden über die Übertragbarkeit des kalibrierten KI-Modell auf andere Bauwerke.

Durch das hier vorgestellte Pilotprojekt kann künftig die Nachhaltigkeit eines Gebäudes bei gleichzeitiger Maximierung des Wohlbefindens und der Gesundheit der Nutzer erreicht werden. Die Idee des Start-up-Unternehmens M&M Network-Ing UG ist es, ein intelligentes Fassadensteuerungssystem mit der Technologie der Künstlichen Intelligenz zu schaffen, das auf dem Credo basiert: „Das Gebäude lernt seinen Nutzer kennen“.

In einem geplanten Forschungsprojekt zwischen der M&M Network-Ing UG, der TU Darmstadt und der IconicSkin GmbH soll das hier vorgestellte Konzept in einem Pilotprojekt in einem realen Szenario untersucht werden und Einblicke in die Zukunft des Bauens mit adaptiven und steuerbaren Gebäudehüllen aus Glas ermöglichen.

5 Literatur

- [1] Klein, T. (2013) *Integral Facade Construction: Towards a new product architecture for curtain walls*. TU Delft.
- [2] Böke, J.; Knaack, U.; Hemmerling, M. (2019) State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems, *Intell. Build. Int.*, vol. 11, no. 1, pp. 27–45.
- [3] Böke, J.; Knaack, U.; Hemmerling, M. (2020) Prototype of a cyber-physical façade system, *J. Build. Eng.*, p. 101397, 2020.
- [4] Barbosa, F. et al. (2017) Reinventing construction: a route to higher productivity, *McKinsey Glob. Inst.*
- [5] Bishop, C.M. (2006) *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [6] Kraus, M.A. (2019) *Machine Learning Techniques for the Material Parameter Identification of Laminated Glass in the Intact and Post-Fracture State*, Universität der Bundeswehr, München.
- [7] Kraus, M.A.; Drass, M. (2020) Artificial Intelligence and Machine Learning for Structural Glass Engineering Applications – Overview, Case Studies and Potentials, *Glas. Struct. Eng.*
- [8] Goodfellow, I.; Bengio, Y.; Courville, A. (2016) *Deep Learning*. MIT Press.
- [9] Kraus M. A.; Drass M. (2020) Künstliche Intelligenz für die Gebäudehülle, *Dtsch. Ingenieurblatt*, no. 4.
- [10] Brunton, S.L.; Kutz, J.N. (2019) *Data-driven science and engineering: Machine learning, dynamical systems, and control*. Cambridge University Press.
- [11] Hanc, M.; McAndrew, C.; Ucci, M. (2019) Conceptual approaches to wellbeing in buildings: a scoping review, *Build. Res. Inf.*, vol. 47, no. 6, pp. 767–783.

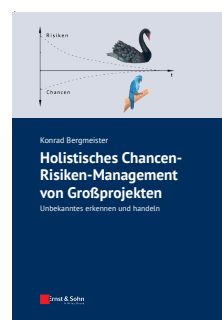
Konrad Bergmeister

Holistisches Chancen- Risiken-Management von Großprojekten

Unbekanntes erkennen und handeln

- Risiken und Chancen bei Großprojekten systematisch erkennen und handeln
- wissenschaftlich basiert
- in der Praxis erprobt

Das Buch geht auf den Umgang mit unerwarteten Ereignissen wie Naturgefahren oder Schadensfällen bei Großprojekten ein und erläutert eine systematische, ganzheitliche Vorgehensweise zum Chancen-Risiken-Management.



2 / 2021 · ca. 258 Seiten ·
ca. 58 Abbildungen · ca. 30 Tabellen

Softcover

ISBN 978-3-433-03330-2 ca. € 39.90*

eBundle (Print + PDF)

ISBN 978-3-433-03331-9 ca. € 49.90*

Bereits vorbestellbar.

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3330

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

KLEBTECH

**Qualitätssicheres Kleben
für das Glas im Bauwesen**

www.klebtech.de