Abschlussbericht 05/2026 - WIR! – GRAVOmer

SmartGlass-UKP

Opto-elektronische Sensorstrukturen durch geformte ultra-kurze Laserpulse für die dynamische Funktionalisierung zu intelligenten Glasoberflächen

Förderkennzeichen: 03WIR2015C

Projektlaufzeit: 01.04.2023 – 31.12.2025

Projektleiter: Alexander Kunert
Autor: Sebastian Walther

Teilvorhaben C (ICM):

Entwicklung von Steuer- und Sensorelektronik sowie zugehöriger Auswertealgorithmen für smartes Mehrscheibenisolierglas

Gefördert von:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

ICM
Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.

Konsortium

HEGLA boraident GmbH & Co. KG (**HEGLA**)
Glaszentrum Magdeburg (**Glas MD**)
Boraglas GmbH (**Boraglas**)
ICM – Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V. (**ICM**)
Fraunhofer CSP/IMWS (**CSP**)

Teil I – Kurzbericht

Ziel des Teilvorhabens des ICM e.V. war die Entwicklung einer integrierten Sensor- und Elektronikarchitektur für Isolierglas, bei der mehrere Sensoreinheiten über strukturierte Leiterbahnen direkt auf der Glasoberfläche kontaktiert und mit einer zentralen Steuereinheit verbunden werden. Im Fokus standen dabei die Entwicklung geeigneter Schnittstellen für Datenübertragung und Energieversorgung, die Auswahl und Integration geeigneter Sensorkonzepte sowie die Entwicklung von Algorithmen zur Auswertung der Sensordaten.
Der Stand der Technik zeigt, dass funktionale Beschichtungen auf Glas, insbesondere elektrisch leitfähige Schichten wie Low-E oder Silberbeschichtungen, bereits etabliert sind und prinzipiell für elektrische Anwendungen genutzt werden können. Ebenso existieren Technologien zur Strukturierung solcher Schichten, beispielsweise durch Laserabtrag, wodurch leitfähige Leiterbahnstrukturen erzeugt werden können. Die Integration verteilter Sensorsysteme mit direkter Kontaktierung auf Glas sowie deren Einbindung in einen Isolierglasverbund stellt jedoch eine wesentliche Erweiterung des bisherigen technologischen Ansatzes dar.
Im Rahmen des Projekts wurden Sensorkonzepte zur Erfassung relevanter physikalischer Parameter entwickelt. Hierzu zählen insbesondere Temperatur, Luftfeuchte, Druck sowie Gaskonzentrationen im Scheibenzwischenraum. Für die Umsetzung wurden bevorzugt marktverfügbare Sensorkomponenten untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Zum Einsatz kamen unter anderem piezoresistive Drucksensoren, temperaturabhängige Widerstandselemente (PTC) sowie kapazitive Feuchtesensoren. Kombinierte Sensormodule (Mixed-Signal-ASICs) wurden aufgrund ihrer kompakten Bauweise und reduzierten Schnittstellen bevorzugt.
Eine direkte Messung der Konzentration von Edelgasen wie Argon oder Krypton im Isolierglas erwies sich als nicht praktikabel, da keine geeigneten marktverfügbaren Sensoren existieren. Allerdings konnte experimentell gezeigt werden, dass über die Messung von CO_2-Konzentrationen mittels NDIR-Technologie indirekte Rückschlüsse auf die Gaszusammensetzung möglich sind.

Die elektrische Anbindung der Sensoren erfolgt über Leiterbahnen, die durch Laserstrukturierung in die leitfähige Beschichtung des Glases eingebracht werden. Diese Leiterbahnen bilden die zentrale Schnittstelle zwischen Sensorik und Steuereinheit und ermöglichen eine platinenähnliche Verschaltung direkt auf der Glasoberfläche. Die Kontaktierung der Sensorelemente wurde erfolgreich mittels Ultraschalllötverfahren realisiert, aber auch weitere Kontaktierungsmöglichkeiten stellten sich als tauglich heraus.
Im Projektverlauf wurden mehrere Layoutvarianten entwickelt und hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften untersucht. Es zeigte sich, dass die Leiterbahnen aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Beschichtung sowohl resistive als auch kapazitive Effekte aufweisen, die mit zunehmender Leitungslänge zu Signalverschlechterungen führen. Zudem wurde ein Übersprechen zwischen benachbarten Leitungen beobachtet. Durch gezielte Optimierung des Layouts, insbesondere durch Reduktion des Flächenwiderstands der Leiterbahnen, konnte ein funktionsfähiges Design realisiert werden. Für einen Sensorabstand von 90 cm wurde ein Parallelwiderstand von unter 1 kΩ sowie eine Leitungskapazität von unter 100 pF erreicht.
Die Datenkommunikation wurde zunächst auf Basis des 1-Wire-Protokolls umgesetzt und erfolgreich über eine Leitungslänge von bis zu 30 cm getestet. Die Signalparameter wurden an die spezifischen Eigenschaften der Glasleiterbahnen angepasst, um eine stabile Datenübertragung zu gewährleisten.
Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung geeigneter Kontaktierungskonzepte. Die Untersuchungen zeigten, dass eine direkte Kontaktierung der Low-E-Beschichtung grundsätzlich möglich ist, jedoch durch zusätzliche leitfähige Kontaktflächen deutlich verbessert werden kann.

Hierzu wurden verschiedene Varianten von Federkontakten erprobt und hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit bewertet.
Zur Integration der Sensorik wurde eine flexible Trägerplatine auf Basis von Flex-Leiterplatten entwickelt. Diese ermöglicht die Bestückung mit SMD-Komponenten unter standardisierten Bedingungen und kann anschließend über kontaktierte Pads auf die Glasoberfläche aufgebracht werden. Dadurch wird die Montage vereinfacht und die Reproduzierbarkeit erhöht.
eben der Sensorintegration wurde auch die Systemarchitektur der Steuerelektronik entwickelt und getestet. Diese übernimmt die Erfassung, Vorverarbeitung und drahtlose Übertragung der Sensordaten. Für die Funkkommunikation wurde ein 868-MHz-System implementiert. Nach Bewertung verschiedener Technologien wurde aus Gründen der Energieeffizienz die EnOcean-Funktechnologie favorisiert.
Ein zentrales Entwicklungsthema stellte das Energie- und Lademanagement dar. Ziel war ein energieautarker oder zumindest energieeffizienter Betrieb des Systems. Durch die Implementierung einer Standby-Schaltung mit einer Stromaufnahme von etwa 1 µA konnte eine signifikante Reduktion des Energieverbrauchs erreicht werden. In Abhängigkeit vom Sendeintervall sind damit Betriebszeiten von mehreren Jahren realistisch. Als Energiequellen wurden insbesondere Energy-Harvesting-Ansätze, beispielsweise mittels Solarzellen, verfolgt. Ergänzend wurden Batteriesysteme wie Knopfzellen oder $LiFePO_4$-Speicher untersucht.
Im Rahmen von Funktionstests im Glasverbund konnte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der entwickelten Sensor- und Steuerelektronik nachgewiesen werden. Dabei wurden auch Algorithmen zur automatisierten Auswertung der Sensordaten entwickelt, die eine kompakte und zuverlässige Interpretation der Messwerte ermöglichen.
Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass eine Integration verteilter Sensorsysteme mit direkter Leiterbahnkontaktierung auf Glas technisch realisierbar ist. Gleichzeitig konnten wesentliche Herausforderungen identifiziert und adressiert werden, insbesondere im Bereich der elektrischen Eigenschaften der Leiterbahnen, der Kontaktierung sowie der energieeffizienten Systemauslegung.
Insgesamt schafft das Teilvorhaben eine wesentliche Grundlage für intelligente Verglasungssysteme mit integrierter Zustandsüberwachung und Kommunikationsfähigkeit. Die entwickelten Konzepte und Technologien bilden die Basis für eine zukünftige industrielle Umsetzung und die Erweiterung hin zu vernetzten Gebäudehüllen.

Teil II – Eingehende Darstellung

In den Arbeitspaketen wurden sowohl Konzepte erarbeitet als auch deren Umsetzungen erprobt. Als Ergebnis der Ausarbeitung der Anforderungen wurde zunächst ein Lastenheft erstellt, welches die normativen Anforderungen, Produktanforderungen und Beschreibungen von Systembaugruppen und einzelner Module enthält. Im weiteren Verlauf wurden anhand der Sensorkonzeption konkrete Bauteile für die Messung der Isolation anhand Temperatur, Luftfeuchte und Gaskonzentration hinsichtlich Baugröße, Stromaufnahme und Ansteuerungsmöglichkeiten ausgewählt und unter Laborbedingungen getestet.
Eine wichtige Erkenntnis hinsichtlich der Gas-Sensorik ist, dass es keine für das Vorhaben praktikable und am Markt verfügbare Sensorik zur direkten Messung von Isoliergaskonzentrationen wie Argon oder Krypton gibt. Allerdings hat sich in Versuchen gezeigt, dass man über die Messung von CO_2-Konzentrationen mittels NDIR-Technologie durchaus plausible Rückschlüsse auf die Edelgaskonzentration ziehen kann.
Zusammen mit den Projektpartnern wurden bereits mehrere Layouts für Laserstrukturierung umgesetzt, zum einen zur Analyse der elektrischen Eigenschaften und zum anderen für erste Versuche anhand ausgewählter Übertragungsprotokolle. Die Kommunikation mit einem Temperatursensor läuft über eine Strecke von 30cm unter Verwendung des 1-wire-Protokolls und wurde erfolgreich getestet. Die Kontaktierung der Sensoren erfolgte per Ultraschalllötverfahren (Abbildung 1).

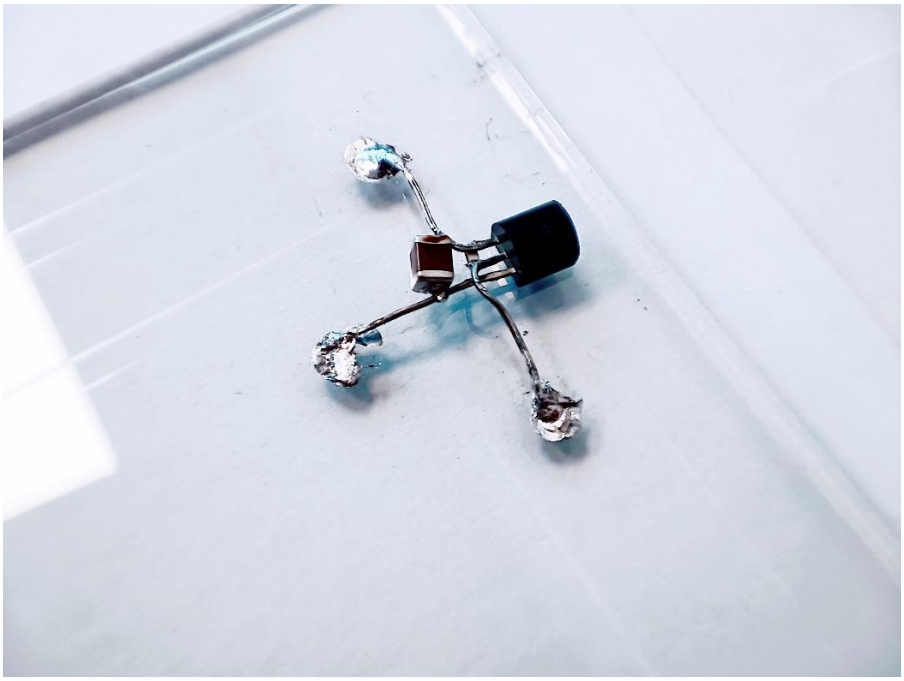

Abbildung 1: Kontaktierung Temperatursensor per Ultraschallot #CS186

Die elektrischen Eigenschaften sind, wie bereits bei gegebener Schichtdicke vermutet, von kapazitiven und resistiven Effekten begleitet und verschlechtern sich mit zunehmender Leitungslänge erheblich. Auch ein Übersprechen (Cross-Talk) auf benachbarte Leitungen ist zu beobachten. Im weiteren Projektverlauf wurde ein funktionierendes Layout erzeugt, bei dem der Parallelwiderstand auf < 1,0 kΩ bei 90 cm Leitungslänge verringert wurde. Das war möglich durch Verringerung des Flächenwiderstand der Versorgungs- und Signalleitungen. Die Leitungskapazität betrug im getesteten

Layout < 100pF. Signalpegel und Frequenzen wurden zur erfolgreichen Kommunikation über den 1-wire-Bus auf die vorliegende Anwendung angepasst (Abbildung 2).

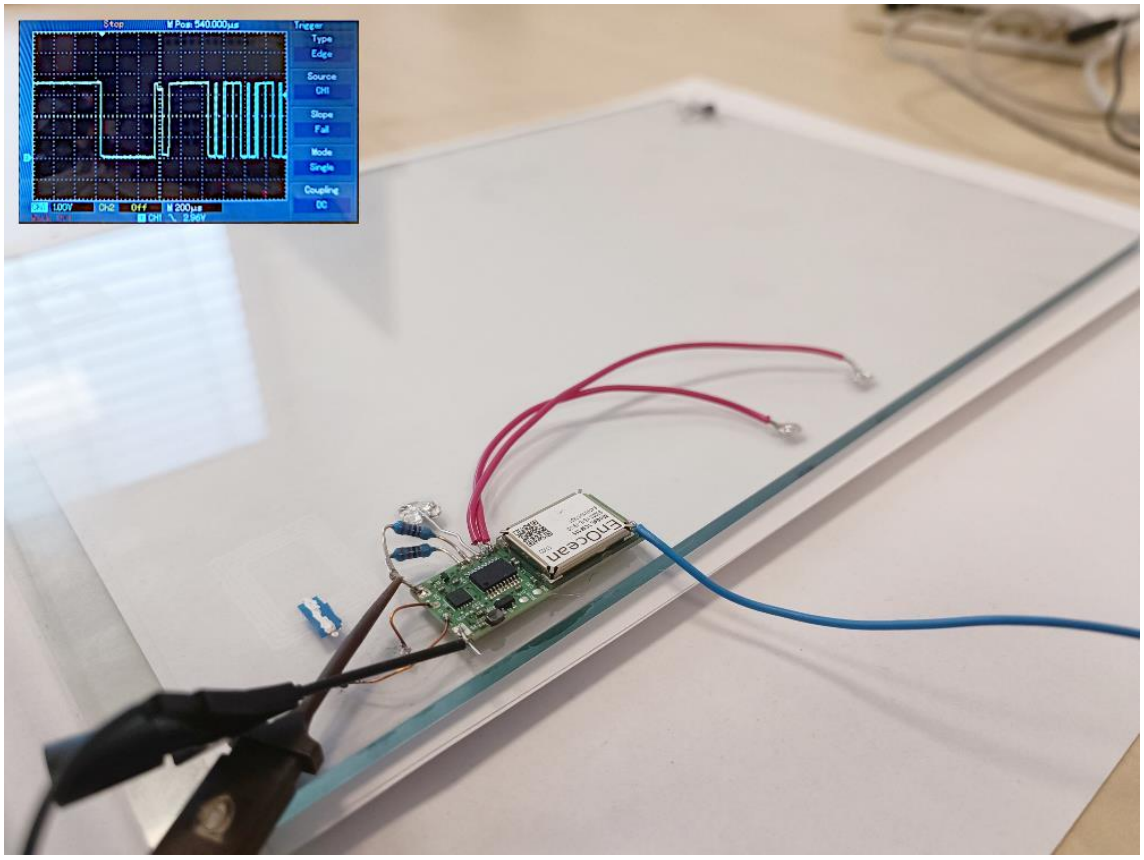

Abbildung 2: Anbindung von Sensoren über 1-wire

Im Rahmen des AP 3 und AP 4 wurden in den vergangenen Entwicklungsphasen zahlreiche Fortschritte erzielt. Zu Beginn wurde das Layout der funktionalen Oberfläche grundlegend überarbeitet. Dies beinhaltete eine neue Strukturierung der Leiterbahnen und Anschlüsse, um die Anforderungen an die Funktionalität und Integration der Komponenten besser zu erfüllen. Im Nachgang dieser Umstrukturierung wurden zunächst zwei Goldfederkontakte zur Platine hinzugefügt (siehe Abbildung 3), um eine zuverlässige Verbindung sicherzustellen respektive zu testen. Dabei stellte sich heraus, dass eine direkte Kontaktierung der Low-E Beschichtung zwar möglich ist, aber deutlich besser funktioniert mit einer zusätzlichen leitfähigen Schicht.

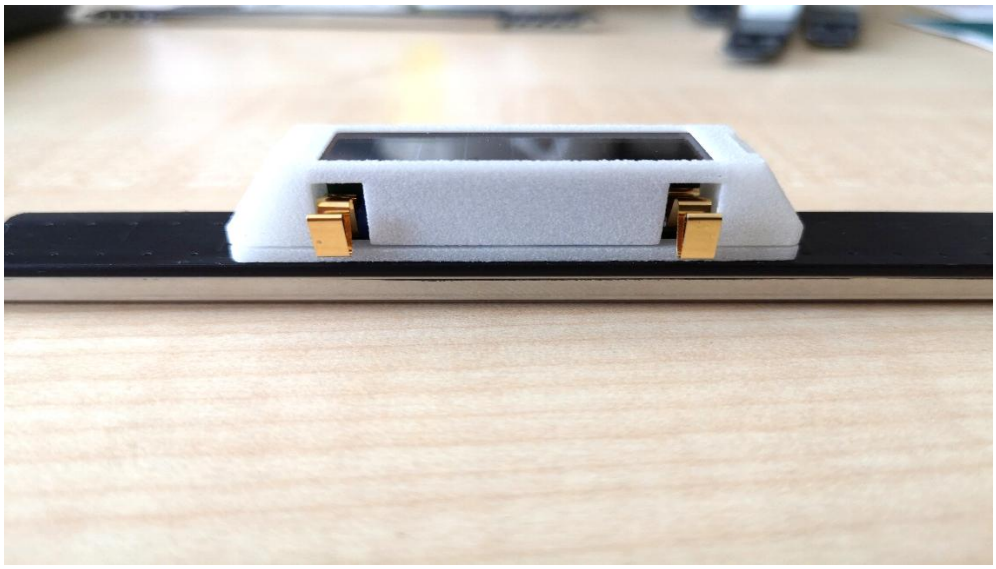

Abbildung 3: Erster Prototyp auf Abstandshalter mit 2 Kontaktfedern

Im weiteren Verlauf wurden verschiedene Kontaktierungsarten getestet. Zudem wurde ein zusätzlicher Federkontakt für die Gewährleistung der Versorgung und das eigentliche Bussignal integriert (Abbildung 4). Die Sensorsteuerung wurde intensiv getestet und weiterentwickelt. Im Zuge dessen wurde der Bustakt für das 1-wire-Protokoll angepasst, um eine stabile und effiziente Kommunikation zu gewährleisten. Parallel dazu wurde eine Adapterplatine auf Basis von Flex-Leiterplatten entwickelt und erfolgreich als Träger für Sensoren getestet. Die Schnittstelle zur Sensoranbindung wurde im weiteren Projektverlauf ebenfalls erprobt und auf eine I^2C-Basis weiterentwickelt. Die abschließenden Tests dieser neuen Schnittstelle fielen erfolgreich aus, zusammen mit dem neuen Layout.

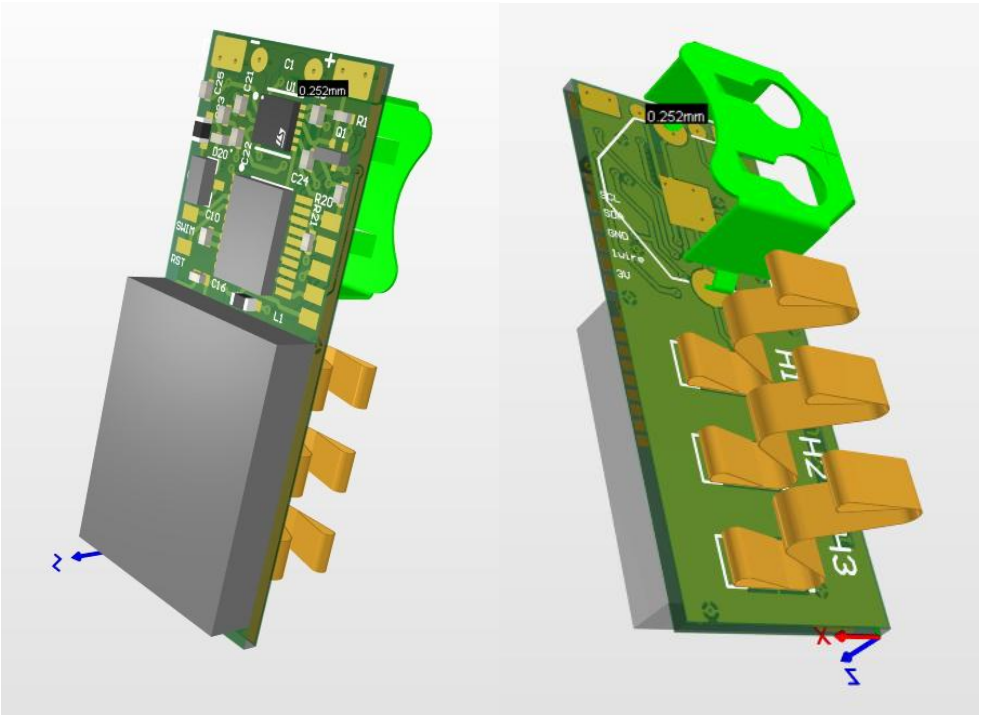

Abbildung 4: Weiterentwicklung der Steuerelektronik mit 3. Kontaktfedern

Im Arbeitspaket 4 lag der Fokus auf der Umsetzung und dem Test der Steuer- und Sensorelektronik im Glasverbund. Hierbei wurden die spezifischen Anforderungen an die Integration elektronischer

Komponenten in Verbundmaterialien berücksichtigt und erste erfolgreiche Tests durchgeführt. Ein Schwerpunkt lag hierbei auf der Auslegung und Optimierung von Übertragungsprotokollen sowie Funkschnittstellen, um eine zuverlässige und effiziente Datenübertragung zu gewährleisten. Parallel dazu wurden Algorithmen zur Auswertung der Sensordaten entwickelt, um eine kompakte und automatisierte Analyse der erfassten Messwerte zu ermöglichen.
Hinsichtlich der Auswahl und Auslegung der Funktechnologien fand eine Zusammenarbeit mit der Dresden Elektronik GmbH statt. Deren Expertise im Bereich der energiesparenden Funkprotokolle, insbesondere ZigBee Green Power wurde im Rahmen eines Unterauftrags hinzugezogen. In der gemeinsamen Erarbeitung der Übertragungsmöglichkeiten fiel die Entscheidung, aus Gründen der Energieeffizienz weiterhin auf die ENOCEAN-Funktechnologie zu setzen. Auch in dieser Technologie konnte Dresden Elektronik zur Weiterentwicklung der Funkübertragung zur Anbindung an Smart Home Systeme beitragen. Auch das Energie- und Lademanagement wurde weiterentwickelt, um einen energieeffizienten und nachhaltigen Betrieb der gesamten Elektronik sicherzustellen. Durch die Entwicklung einer effektiven Standby-Schaltung mit einer mittleren Stromaufnahme von 1 µA kann die Steuerelektronik abhängig vom Sendezyklus mehrere Jahre betrieben werden. Weiterführende Tests sind nötig, um eine hinreichend genaue Abschätzung zu erhalten. Es wird eine Versorgung per Solarzelle angestrebt, da hier bereits gute Erfahrungen im Bereich Energy Harvesting vorhanden sind und die Tauglichkeit im Isolierglas nachgewiesen ist. Parallel dazu wird der Einsatz von Knopfzellen und LiFePO4-Speicher untersucht, sofern die Sendezyklen programmatisch so angepasst werden können, dass nur bei signifikanten Änderungen der Sensordaten gesendet wird. Zum Test wurden erste Platinen prototypisch hergestellt und bestückt. Abbildung 5 zeigt diesen Entwicklungstand der Steuerplatine.

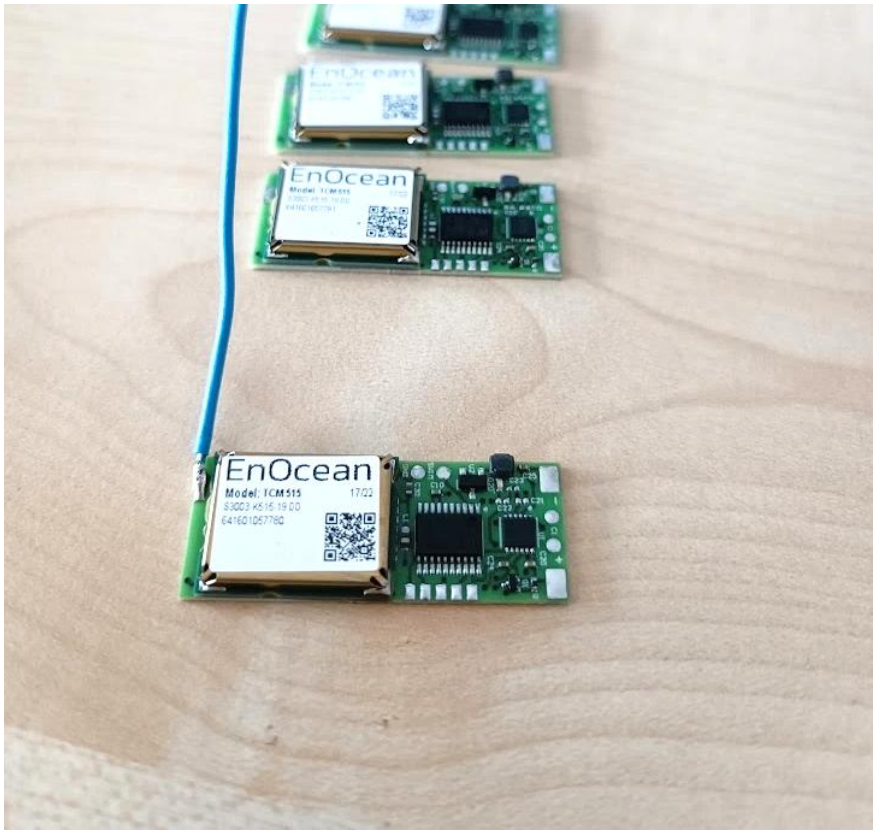

Abbildung 5: Prototypische Herstellung der Steuerelektronik

Ein weiterer Fortschritt des Vorhabens war die Weiterentwicklung einer dünnen flexiblen Trägerplatine für Sensoren, die in nachfolgender Abbildung 6 dargestellt ist. Hierdurch wird die

Aufbringung von Sensorik auf die funktionale Oberfläche wesentlich vereinfacht. SMD-Komponenten werden, wie auf einer handelsüblichen Platine bestückt. Über die vergoldeten Pads kann die Trägerplatine im sichtbaren oder nicht sichtbaren Bereich des Glases per Ultraschalllötverfahren oder per Klebetechnik aufgebracht werden.

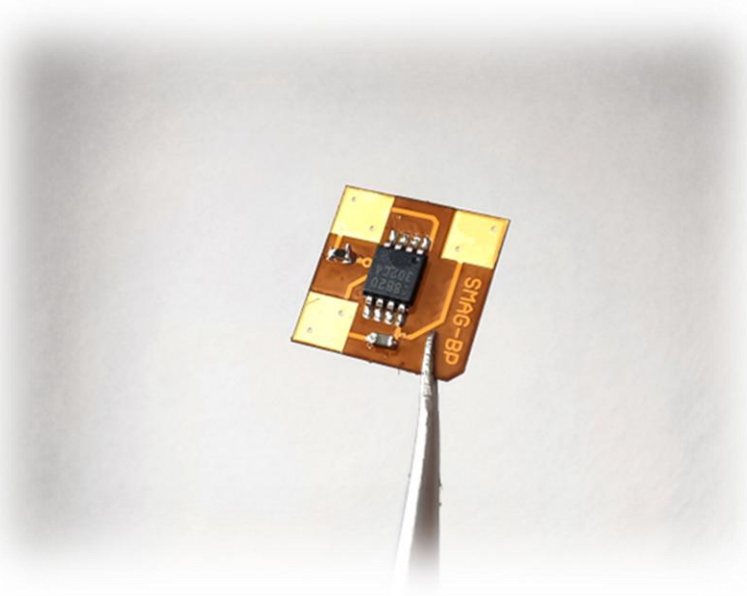

Abbildung 6: Trägerplatine für Sensoren

Ein weiterer Entwicklungsschritt war die Einbringung einer Nahfeldantenne (NFC). Diese dient zur direkten Übertragung und Speicherung von Daten. Die Hauptarbeit lag in der Auslegung der Antennenstruktur und der Durchführung von Versuchen zum Aufbringen auf die Versuchsscheiben per Laserstrukturierung. Auf jeder 2. Versuchsscheibe mit laserstrukturierten Leiterbahnen wurde am Rand eine Spule aufgebracht, variierend in ihren Parametern. Letztendlich führt der höhere Widerstand der Low-E-Schicht dazu, dass die Güte (Q-Faktor) des Schwingkreises durch die zu hohe Impedanz sinkt und eine Übertragung unmöglich wird. Im Rahmen dieses Vorhabens konnte keine funktionierende NFC-Antenne durch Laserstrukturierung eingebracht werden (vgl. Abbildung 7). Weitere Versuche mit anderen Beschichtungen und Technologien sind jedoch in Folgeprojekten angedacht. Im Demonstrator wurde zur Abbildung der Funktionalität des induktiven Ladens zunächst mit einer zugekauften NFC-Antenne gearbeitet.

Abbildung 7: Versuch Integration NFC-Antenne

Zuletzt fanden UV-kombinierte Klimatests von -20 °C bis knapp über 70 °C statt, sowie Tests und daraus resultierende Optimierung der Funkreichweite. Die Temperaturstabilität ist bis ca. 75 °C gegeben, doch der Test muss in Hinblick auf eine Mögliche Weiterentwicklung erweitert werden bis 85 °C. Es hat sich herausgestellt, dass vor allem in 3-fach-Isolierglasverbund die Temperatur bis 85 °C ansteigen kann, was die aktuellen Komponenten nicht leisten, wohl aber mit ein paar Änderungen möglich ist.
Die Kommunikationsqualität und -stabilität ist in den gängigen Fenstertypen hervorragend mit Ausnahme von Metallrahmen. Während im Versuch mit Einfachglas der Funk kaum gedämpft wird, kann eine moderne 2- oder 3-fach Wärmeschutzverglasung nachweislich eine Dämpfung von 20 bis 30 dB bei 2.4 GHz erzeugen. Das entspricht einer Reduktion des Signals auf etwa 1/100 der ursprünglichen Leistung. In unserer Anwendung wird nach wie vor mittels ENOCEAN Funktransceivern eine Frequenz von 868 MHz verwendet. Die damit ermittelten Werte sind akzeptabel, selbst mit Einführung der Drahtschwanz-Antenne in den Abstandshalter, was zusätzliche 5 dB Dämpfung bedeutet.
Insgesamt zeigt sich im Vorhaben, dass alle wesentlichen Aspekte von der Hardwareintegration über die Funkkommunikation bis hin zur Datenauswertung und dem Energiemanagement systematisch bearbeitet und optimiert wurden.

Teil III – Erfolgskontrollbericht

Im Teilvorhaben des ICM e.V. wurde die Entwicklung einer Sensor- und Elektronikarchitektur für Isolierglas verfolgt, bei der mehrere Sensoreinheiten über strukturierte Leiterbahnen auf dem Glas kontaktiert und mit einer zentralen Steuereinheit verbunden werden. Ziel war es, die technische Grundlage für ein intelligentes Isolierglas mit integrierter Zustandsüberwachung, energieeffizienter Datenverarbeitung und drahtloser Kommunikation zu schaffen. Die im Projekt bearbeiteten Fragestellungen umfassten insbesondere die Auswahl geeigneter Sensorkonzepte, die Entwicklung der elektrischen Schnittstellen auf Glas, die Auslegung von Übertragungs- und Kontaktierungskonzepten sowie das Energie- und Lademanagement der Elektronik. Leitfähige Beschichtungen auf Glas, insbesondere Low-E-Schichten mit metallischen Bestandteilen, können grundsätzlich als funktionale elektrische Strukturen genutzt werden, während EnOcean im 868-MHz-Band als energieeffizienter Funkstandard für Gebäudelösungen etabliert ist.

Als wissenschaftlich-technisches Ergebnis konnte die grundsätzliche Machbarkeit der Integration mehrerer Sensorelemente in den Isolierglasverbund nachgewiesen werden. Im Projekt wurden geeignete Sensorkonzepte für Temperatur, Luftfeuchte, Druck und Gase konzipiert, bewertet und unter Laborbedingungen getestet. Dabei zeigte sich, dass marktverfügbare Sensorik für mehrere Zielgrößen grundsätzlich einsetzbar ist, wenn Baugröße, Stromaufnahme und Integrationsfähigkeit in die Glasumgebung berücksichtigt werden. Für die Bewertung von Gaskonzentrationen ergab sich die wesentliche Erkenntnis, dass direkt verfügbare Sensorik zur Messung von Edelgasen wie Argon oder Krypton für den vorgesehenen Anwendungsfall derzeit nicht praktikabel ist. Demgegenüber erwies sich die CO2-Messung mittels NDIR-Technologie als technisch belastbarer Ansatz, da diese Technologie auf der infraroten Absorption einer charakteristischen Wellenlänge basiert und sich durch gute Langzeitstabilität auszeichnet.

Ein zentrales Projektergebnis liegt in der Entwicklung und Erprobung laserstrukturierter Leiterbahnlayouts auf beschichteten Glasoberflächen vor. Es konnte gezeigt werden, dass die leitfähige Beschichtung des Glases prinzipiell zur Realisierung elektrischer Signal- und Versorgungsstrecken geeignet ist. Gleichzeitig wurden die wesentlichen technologischen Grenzen präzisiert. Mit zunehmender Leitungslänge beeinflussen resistive und kapazitive Effekte die Signalqualität deutlich, zudem ist Übersprechen zwischen benachbarten Leitungen zu berücksichtigen. Durch Layoutoptimierungen und die Verringerung des Flächenwiderstands konnten diese Effekte so weit reduziert werden, dass eine stabile Kommunikation mit ausgewählten Sensorkomponenten möglich wurde. Ebenso wurde nachgewiesen, dass die Kontaktierung der Sensoren mittels Ultraschalllötverfahren grundsätzlich geeignet ist.

Eine erstrebenswerte Innovation hätte die im Glas strukturierte NFC-Antenne sein können. Hinsichtlich der Bedeutung dieser Möglichkeit nahm das ICM den zusätzlichen Aufwand in Kauf, konnte jedoch bislang keine praxistaugliche Lösung umsetzen. An dieser Stelle sind weitere Forschungsarbeiten geplant, die auf die bisherigen Erkenntnisse aufbauen.

Zu den erreichten Nebenergebnissen zählen insbesondere die Entwicklung einer dünnen flexiblen Trägerplatine für die Sensorintegration, die Erprobung unterschiedlicher Kontaktierungsvarianten zwischen Sensorik, Glasoberfläche und Steuereinheit sowie die Weiterentwicklung einer energieeffizienten Steuerarchitektur. Dabei konnten wesentliche Erfahrungen für die praktische

Umsetzung gesammelt werden. Hierzu gehört die Erkenntnis, dass eine direkte Kontaktierung funktionaler Beschichtungen grundsätzlich möglich ist, die Prozesssicherheit jedoch durch zusätzliche leitfähige Kontaktflächen oder elektrischer. Bauteile verbessert werden kann. Ebenso wurde deutlich, dass die mechanische und prozesssichere Integration miniaturisierter Sensorik auf Glas nicht allein eine elektrische, sondern in hohem Maße auch eine fertigungstechnische Fragestellung darstellt. Nicht betrachtet wurde z.B. die ästhetische Komponente. Versuche, die Sensoren in den nicht sichtbaren Bereich zu bringen (z.B. Randbutyl) konnten bislang nicht vollständig realisiert werden. Es werden nach Projektende weiterhin Möglichkeiten evaluiert, die einen im Glas sichtbaren Sensor mit einem Gehäuse oder Überguss zu einem vorzeigbaren Element werden lassen.

Die Fortschreibung des Verwertungsplans ergibt, dass aus dem Vorhaben verwertbare Ergebnisse sowohl im wissenschaftlich-technischen als auch im wirtschaftlichen Sinn hervorgegangen sind. Schutzrechtsrelevante Potenziale bestehen insbesondere bei der Ausgestaltung der Leiterbahngeometrien, der Kontaktierungs- und Integrationskonzepte sowie der Einbindung der Sensorik in den Isolierglasverbund. Soweit hierzu Schutzrechtsanmeldungen erfolgen oder geprüft werden, sind diese projektspezifisch durch die beteiligten Partner gesondert zu bewerten. Unabhängig davon bestehen erkennbare Verwertungsmöglichkeiten in der Nutzung des erarbeiteten Know-hows für weitere Entwicklungsprojekte, für die Zusammenarbeit mit Herstellern von Isolierglas, Fenster- und Fassadensystemen sowie mit Anbietern von Gebäudeautomation und Sensortechnik.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende werden als grundsätzlich positiv eingeschätzt. Intelligente Verglasungssysteme mit integrierter Sensorik bieten funktionale Vorteile gegenüber konventionellen Fenster- und Glaskonstruktionen, da sie Zustandsdaten erfassen, frühzeitige Fehlerindikationen ermöglichen und in energieeffiziente Gebäudeautomationslösungen eingebunden werden können. Für den Standort Deutschland bestehen Potenziale insbesondere in der Verknüpfung von Glasverarbeitung, Sensorik, Elektronik und Gebäudeautomation. Eine kurzfristige Markteinführung ist auf Grundlage des erreichten Entwicklungsstands noch nicht abzuleiten. Realistisch erscheint jedoch eine weitere vorwettbewerbliche Entwicklung mit anschließender Pilotierung in anwendungsnahen Demonstratoren.

Auch die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten nach Projektende sind positiv zu bewerten. Die Ergebnisse können in weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten genutzt werden, etwa zur Langzeitstabilität, zur Miniaturisierung, zur Erhöhung der Prozessrobustheit sowie zur Verbesserung der Energieversorgung und Kommunikationsstrategien. Ebenso ist eine Nutzung der Ergebnisse in Verbundprojekten mit Forschungseinrichtungen, Industriepartnern und Transfernetzwerken möglich. Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern sowie die Einbindung externer Expertise, unter anderem zu Funktechnologien, haben gezeigt, dass eine interdisziplinäre Weiterentwicklung fachlich sinnvoll und erfolgversprechend ist.

EnOcean ist als international standardisierte Funktechnologie für energiearme Gebäudelösungen etabliert und unterstützt damit grundsätzlich die Anschlussfähigkeit an bestehende Systeme. Am ICM wurde als Nebeninnovation parallel zum Projekt ein Gateway entwickelt, welches die Informationen der Sensoren und Aktoren in eine Cloud senden kann und damit die Anschlussfähigkeit herstellt.

Zu den Arbeiten, die im Projekt noch zu keiner abschließenden Lösung geführt haben, gehören insbesondere die direkte und wirtschaftlich robuste Messung der Edelgaskonzentration im

Scheibenzwischenraum, die vollständige Beherrschung aller elektrischen Nebeneffekte bei langen Leiterbahnstrecken auf beschichteten Glasflächen sowie die abschließende Validierung einzelner Energieversorgungskonzepte unter realen Langzeitbedingungen. Diese offenen Punkte schmälern die Relevanz der erzielten Ergebnisse nicht, sondern konkretisieren den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Die Ausgaben- und Zeitplanung wurden insgesamt mit zu vernachlässigenden Abweichungen eingehalten. Insgesamt ist festzustellen, dass das Teilvorhaben des ICM e.V. die wesentlichen technologischen Risiken der sensorischen und elektronischen Integration in Isolierglas systematisch bearbeitet und eine belastbare Grundlage für weiterführende Entwicklungs- und Transferaktivitäten geschaffen hat.