

# Verbesserter Mobilfunkempfang durch frequenzdurchlässige Seitenscheiben in der Kosten-Nutzen-Betrachtung

## Improved Mobile Radio Reception through Frequency-Permeable Windows in the Cost-Benefit Analysis

Dipl.-Ing. Michael Schmäcke, Krefeld (Deutschland)

### Zusammenfassung

Der Anspruch, mit dem Mobiltelefon immer und überall nicht nur telefonieren zu können, sondern auch Daten in hoher Geschwindigkeit zu empfangen, bedingt eine gute Netzabdeckung. In den Zügen des Regional- und Hochgeschwindigkeitsverkehrs sind die Voraussetzungen dafür besonders schlecht.

Die Metallröhre ist für Funkwellen undurchdringlich, es bleibt nur der Weg durch die Fenster. Allerdings sind die Aufgaben, die ein Seitenfenster in Zügen erfüllen muss, umfangreich und widersprüchlich. Eine metallische Beschichtung auf dem Glas ist erforderlich, um den Wärmeverlust aus dem Fahrzeug und den Energieeintrag ins Fahrzeug zu verringern. Jedoch schirmt diese metallische Schicht auch Funkwellen sehr effektiv ab.

Wird die Beschichtung in kleinere geometrische Felder eingeteilt, die voneinander elektrisch getrennt sind, dann kann die Dämpfung für bestimmte Frequenzen reduziert werden. Diese Methode wurde erfolgreich beim Rhein-Ruhr-Express (Desiro HC RRR) umgesetzt.

In diesem Artikel soll aufgezeigt werden, welche Parameter die Auslegung der Seitenscheiben beeinflussen und wie die Gläser so manipuliert werden können, dass der Mobilfunkempfang auch in Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen wie dem Velaro MS (DB Baureihe 408) möglich ist. Weiterhin wird dargelegt, mit welchen analytischen Methoden die Mobilfunktransparenz nachgewiesen werden kann und dass es möglich ist, über Simulationen eine hinreichend genaue Ergebnisvorhersage zu erhalten.

### Abstract

The requirement of being able to make calls with the mobile phone anytime and anywhere and to receive data at high speed requires good network coverage. The conditions for this are particularly bad on regional and high-speed trains.

The metal tube is impervious to radio waves, all that remains is the way through the windows. However, the tasks that a side window must fulfill in trains are extensive and contradictory. A metallic coating on the glass is necessary to reduce the heat loss from the vehicle and the energy transmission into the vehicle.

However, this metallic layer also shields radio waves very effectively. If the coating is divided into smaller geometric fields that are electrically separated from each other, then the attenuation can be reduced for certain frequencies. This method was successfully implemented in the Rhein-Ruhr-Express (Desiro HC RRR).

The aim is to show which parameters influence the design of the side windows and how the glass can be manipulated in such a way that cell phone reception is also possible in high-speed vehicles such as the Velaro MS (DB series 408). Furthermore, it is shown which analytical methods can be used to prove the transmissibility to cellular radio waves and that it is possible to get a sufficiently precise prediction of the results via simulations.

## 1 Einleitung

Telefonieren, E-Mails checken, immer erreichbar sein, in den sozialen Medien, auf Instagram und WhatsApp, 3G, 4G und 5G! Das Mobiltelefon prägt unser Leben und die Erwartungen, dass wir überall eine hervorragende Netzabdeckung ha-

ben, sind hoch. Diesen Anspruch haben wir auch, wenn wir auf Reisen sind oder pendeln, mit dem Zug unterwegs sind. Stellen wir die Frage, warum es denn so ein Problem darstellen soll auch im Zug einen guten Empfang zu bekommen. Zum einen liegt das daran, dass der Zug eine lange Röhre aus Aluminium oder Stahl ist

und dass diese Röhre die elektromagnetischen Strahlen wie ein Faraday'scher Käfig abschirmt. Zum anderen werden die Funkzellen, also die Bereiche der Sendemasten, bei den hohen Geschwindigkeiten sehr schnell durchfahren. Die Übergabe von einer zur anderen Funkzelle muss schnell und reibungslos funktionieren.

Dennoch, die Fenster bestehen aus Glas, dahinter müsste das Telefonieren möglich sein. Allerdings sind in den modernen Zügen nicht einfache Gläser eingebaut, mit denen der Blick auf die Landschaft ermöglicht wird. Eine Seitenscheibe muss eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen, wie nachfolgend gezeigt wird.

Der Gesetzgeber sieht nicht nur Sicherheitsglas vor, auch muss die äußere Scheibe aus Verbundsicherheitsglas (VSG) sein. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit der VELARO-Züge von Siemens ergeben sich bei Zugbegegnungen Druckstöße bis zu 6.000 Pa. Nicht nur vor den Druckstößen, auch vor Gegenständen wie Schottersteinen, die von außen gegen den Zug schlagen können, schützen die Seitenscheiben die Fahrgäste im Inneren. Für den Komfort der Fahrgäste sollen die Seitenfenster eine hohe Schalldämmung aufweisen, um den Geräuscheintrag ins Fahrzeug zu minimieren. Eine weitere Funktion der Scheiben, die im Laufe der Jahre immer bedeutender geworden ist, ist der Einfluss auf das Raumklima. Auf der einen Seite soll die Wärmeenergie im Fahrzeug verbleiben und nicht über die Seitenfenster abfließen. Auf der anderen Seite darf sich das Fahrzeug durch Sonneneinstrahlung nicht stark aufheizen. Der Wärmedurchgangskoeffizient, auch als U-Wert bekannt, beschreibt die Energie, die aus dem Inneren des Fahrzeugs nach außen abfließt, er liegt bei der heutigen Doppelverglasung bei  $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  und ließe sich auf ca.  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  verbessern, wenn eine 3-fach Verglasung eingesetzt werden würde. Aus Gewichtsgründen [1] kommt dies in Schienenfahrzeugen nicht zum Einsatz. Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) beschreibt den Anteil der Sonnenstrahlung, der über die Fenster in das Fahrzeug gelangt. Bleibt noch als letzte Einflussgröße, die Lichttransmission LT, die angibt, wieviel sichtbares Licht durch die Scheiben in den Innenraum gelangt.

## 2 Funktion und Komplexität der Außenverglasung

Physik lässt sich nicht überlisten, die meisten der Anforderungen erfordern gegenläufige Lösungen. Schalldämmung erfordert Masse und einen möglichst großen Scheibenzwischenraum (SZR) der Isoliergläser. Dabei besteht ein logarithmischer Zusammenhang zwischen Schalldämmung und der Größe des SZR [2]. Eine

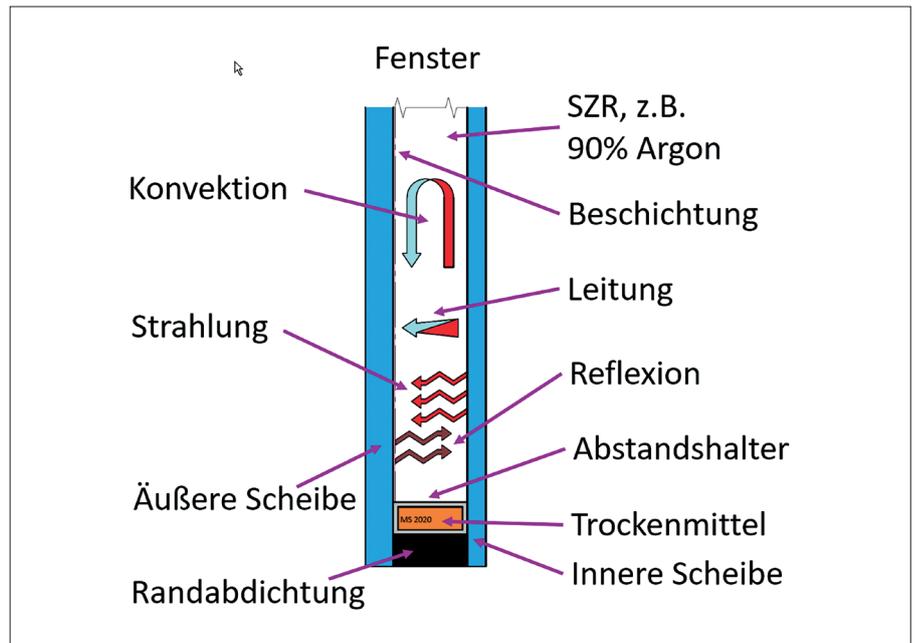


Bild 1: Wärmetransport

hohe Schalldämmung erfordert einen SZR von 24 mm oder größer. Der U-Wert resultiert aus der isolierenden Wirkung des SZR und einer Beschichtung, die die Wärmestrahlung in den Innenraum reflektiert. Im SZR bestimmen die Übertragungsarten den Wärmedurchgang: Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion (Bild 1). Zur Minimierung der Wärmeleitung wird ein Edelgas wie Argon verwendet, dessen Moleküle kleiner sind und deren Molekülabstände größer sind als die der Luft. Um die Wärmeleitung zu verringern, sollte der SZR möglichst groß sein, was aber zur Folge hat, dass der Anteil der Konvektion ab einem

SZR von 16 mm ansteigt. Damit ergibt sich für den SZR ein Optimum zwischen 16 mm und 20 mm [3].

Der g-Wert beschreibt den Gesamtenergiedurchlassgrad ins Fahrzeug. Die Energiestrahlung der Sonne wird durch das Glas teilweise reflektiert und absorbiert. Der absorbierte Teil wird in Wärme umgewandelt und nach außen und innen als sekundäre Wärme abgegeben. Die Wärme, die zusammen mit der restlichen Energiestrahlung in das Innere des Fahrzeugs gelangt (Bild 2), erwärmt das Fahrzeug und muss über die Klimaanlage abgeführt werden. Um den Wärmeeintrag zu verringern, werden Beschichtungen ein-

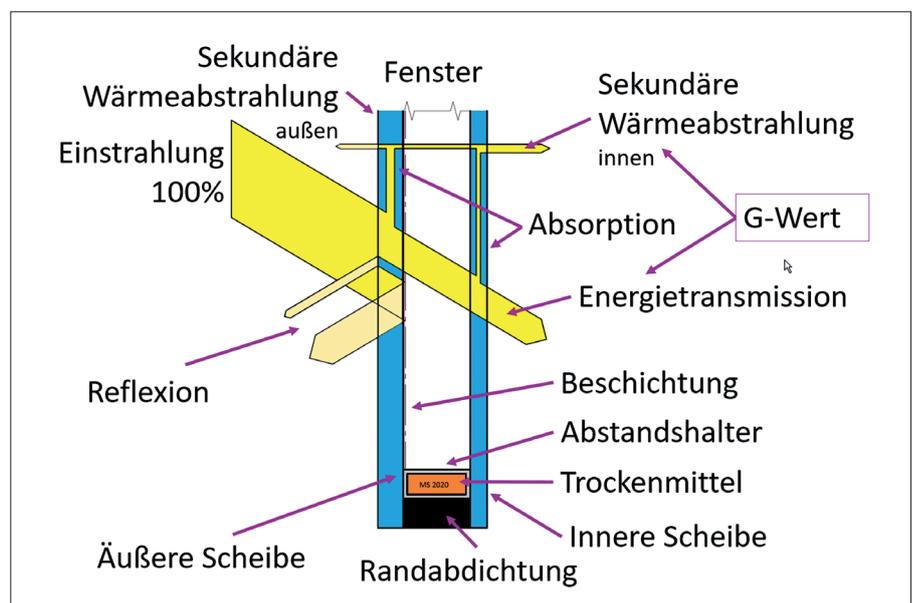


Bild 2: Energietransmission

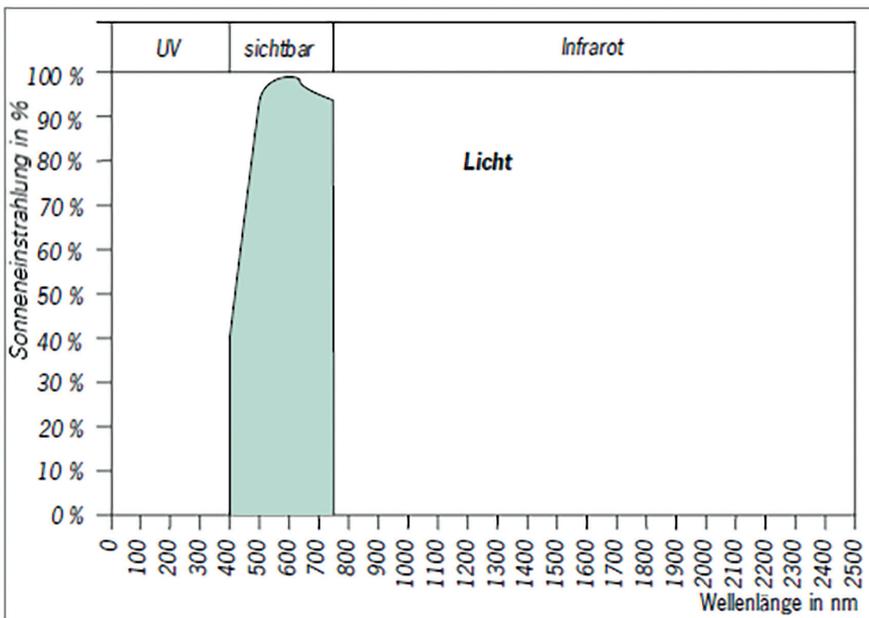
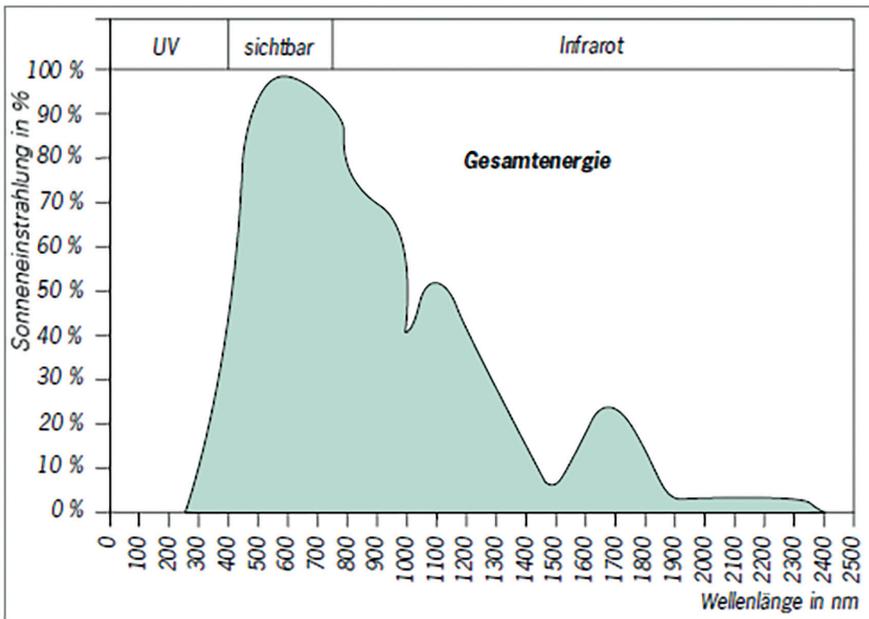


Bild 3: Einstrahlung über Wellenlänge

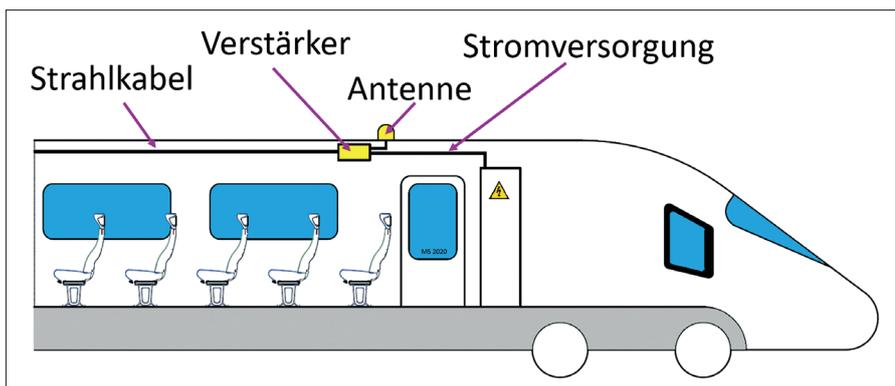


Bild 4: Intrain-Repeater

gesetzt, die die Sonnenstrahlung reflektieren, wie zum Beispiel low-E Beschichtungen, die einen hohen Silberanteil haben. Diese Schichten werden bei der Herstellung der Rohgläser im Floatglasverfahren auf das noch heiße Glas aufgebracht. Eine reine Silberschicht, wie wir sie zum Beispiel auch vom heimischen Badezimmer-Spiegel kennen, hat aber den Nachteil, dass auch das sichtbare Licht reflektiert wird.

Die Beschichtung muss so selektiv sein, dass der unsichtbare Teil des Lichts herausgefiltert wird und der sichtbare Teil passieren kann. Möglich wird das durch eine Zusammensetzung aus verschiedenen Metallen und Metalloxiden. Dennoch ist auch dies ein Kompromiss. Im sichtbaren Spektrum des Lichts wird nicht nur Licht, sondern auch der größte Teil der Sonnenenergie eingestrahlt [4] (Bild 3).

Für den Velaro heißt das, dass ein g-Wert von ca. 23% erreicht wird bei einer Lichttransmission von ca. 40%. Eine weitere Variable ist die Positionierung der Beschichtung. Ideal wäre es, die reflektierende Beschichtung auf der äußersten Ebene aufzutragen. Je weiter außen die Sonneneinstrahlung reflektiert wird, desto weniger wird das System aufgeheizt. Dem umgebenden Sauerstoff ausgesetzt würde sich die Beschichtung allerdings im Laufe der Zeit durch Oxidation verändern, während sie auf der zum SZR gewandten Seite stabil bleibt. Das liegt darin begründet, dass im SZR der Sauerstoffgehalt und die Feuchtigkeit reduziert sind. Deswegen wird die Funktionsschicht immer auf der Glasseite zum SZR aufgebracht. In einigen Fällen werden Beschichtungen auf beiden Flächen mit den unterschiedlichen Funktionen verwendet; auf der Außenseite, um die Energiestrahlung abzuhalten, auf der Innenseite, um die Wärme im Fahrzeug zu halten. Die Beschichtung auf der Innenseite kann aber entfallen, denn aus der Betrachtung von Kosten zu Nutzen kann diese Aufgabe durch eine kombinierte Beschichtung auf der Außenseite übernommen werden.

### 3 Vom Intrain-Repeater zur mobilfunktransparenten Scheibe

Mit der Erkenntnis, dass eine Beschichtung auf den Seitenscheiben notwendig

ist, ergibt sich die Problematik, dass diese Beschichtung auch die Strahlung der Mobilfunkfrequenzen dämpft beziehungsweise reflektiert. Zusammen mit den Interferenzen durch die Bewegung des Zugs und je nach Mobilfunkabdeckung wird das Telefonieren im Zug oftmals stark eingeschränkt. Seit 1997 hat die Deutsche Bahn AG deswegen damit begonnen, die ICE-Flotte und später ausgesuchte Wagen der IC- und EC-Züge, mit Intrain-Repeater auszurüsten (Bild 4). Ein Intrain-Repeater besteht im Wesentlichen aus einer Außenantenne, einem Verstärker und einem Strahlkabel, dies muss in jedem Waggon installiert sein.

Über die Außenantenne werden die Funksignale von der Funkzelle an den Verstärker übertragen und umgekehrt. Der Verstärker überträgt die Signale an das Strahlkabel, welches im Wagen unter dem Fußboden oder hinter der Deckenverkleidung verlegt ist. Das Strahlkabel emittiert damit die Funkwellen der Funkzelle, mit der das Mobiltelefon verbunden ist.

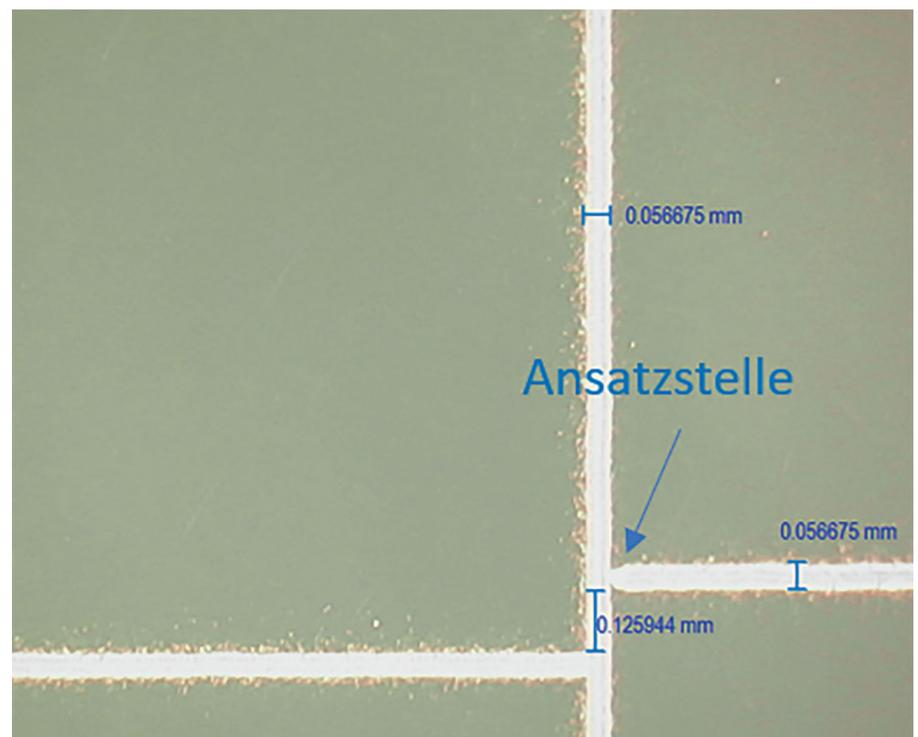
Ein Nachteil dieses Systems sind die hohen Kosten. Hierbei ist die Summierung der Kosten über die Einsatzzeit von 30 Jahren zu betrachten. Zusätzlich zu den Investitionskosten der Komponenten fallen Kosten für den Betrieb an, in erster Linie der Energiebedarf von 100 W pro Verstärker. Ein weiterer Kostenfaktor sind Wartung und Instandhaltung, da selbst Strahlkabel und Antennen gemäß Herstellerangaben nur eine Lebenserwartung von zehn bis zwölf Jahren haben. Hinzu kommt, dass mit jeder neuen Mobilfunkgeneration Komponenten angepasst oder ausgetauscht werden müssen. Neben den Kosten verbirgt sich in der Nutzung von Intrain-Repeater auch ein Risiko für die Inbetriebnahme von Neufahrzeugen. Der Zug wird zur Sendeanlage, die das ankommende Signal verstärkt und abgestrahlt. Dies kann zu einer Rückkopplung und damit zur Beeinträchtigung des Mobilfunknetzes führen. Aus diesem Grund muss jede Sendeanlage zugelassen sein. Diese Zulassung und die dafür benötigte Zeit müssen im Vorfeld eingeplant werden.

Bei der Nutzung eines passiven Systems ohne einen Repeater, entfallen die aufgezählten Kosten. Dazu muss die metallische Beschichtung der Seitenfenster auf geeignete Weise manipuliert werden, um durchlässig für die Wellenlängen der Mobilfunkfrequenzen zu sein. Dafür wird

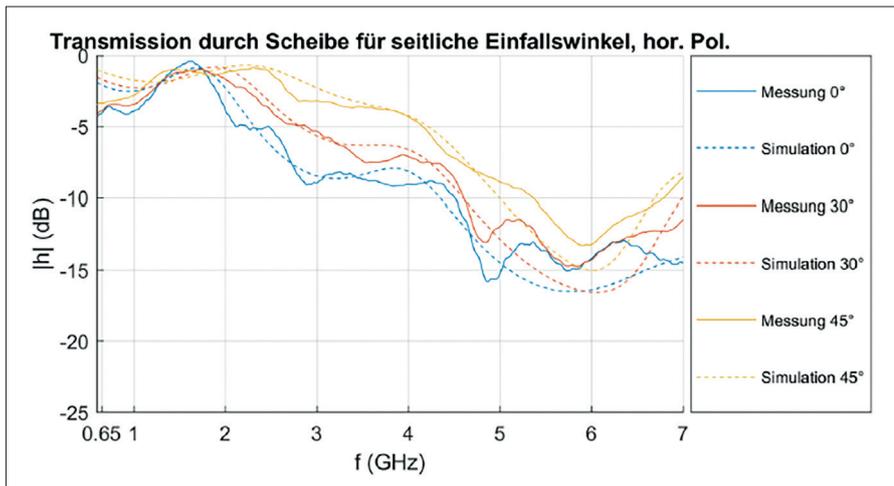
die Beschichtung in kleine abgegrenzte Felder unterteilt, die untereinander elektrisch getrennt sind. Der Frequenzbereich, für den die Dämpfung optimiert werden soll, bestimmt die Größe und geometrische Form der Felder. Mit Hilfe eines Laser-Strahls, in dessen Fokuspunkt die Beschichtung verdampft, können feine beschichtungsfreie Linien gezeichnet werden, die die Felder voneinander trennen. Das so entstehende Muster wiederholt sich über die gesamte Fensterscheibe. In der Praxis kommen dabei Anlagen zum Einsatz, bei denen der Laserstrahl über Spiegel abgelenkt wird wodurch nur eine eingeschränkte Fläche bearbeitet werden kann. Danach wird das Glas unter dem Laser verschoben oder der Laserkopf über dem Glas, um den nächsten Abschnitt zu bearbeiten. Hierbei ist es wichtig, dass die Bearbeitung möglichst übergangsfrei fortgesetzt wird, damit es zu keiner Unterbrechung der Trennlinie kommt und das optische Erscheinungsbild nicht gestört wird. Um dies zu erreichen, ist ein spielfreier Antrieb notwendig. Bild 5 zeigt diese Mikroskopie der Ansatzstelle am Beispiel der Fertigung der Velaro MS Fenster des Glasherstellers Flachglas Wernberg GmbH. In dieser Vergrößerung wird deutlich, dass die angrenzenden Felder elektrisch voneinander getrennt sind und der Versatz zur benachbarten Linie lediglich 1/8 mm beträgt.

Untersuchungen haben gezeigt, dass, wenn der Laser auf die Beschichtung fokussiert wird, die Energie Einkopplung nur in der Beschichtung stattfindet, so dass die Beschichtung verdampft, ohne dass dies zur Beschädigung der Glasoberfläche führt. Zum Nachweis wurden auf einem Druckwechselprüfstand Versuchsreihen mit über einer Million Prüfzyklen bei Amplituden von bis zu  $\pm 10.000$  Pa durchgeführt. Hiernach sind keinerlei Risse oder Brüche im Glas diagnostiziert worden. Auch die Eignung für den Einsatz bei Notausstiegsfenster konnte nachgewiesen werden. Somit sind alle sicherheitstechnischen Aspekte erfüllt und der Einsatz in Schienenfahrzeugen möglich.

Bleibt noch die Bewertung der Komfortkriterien, denn die Linien sind je nach Lichteinfall mehr oder weniger sichtbar. Das wird jedoch nicht als störend empfunden, da das Muster nicht wahrgenommen wird, wenn das Auge in die Landschaft blickt. Die optische Wahrnehmung ist dabei umso geringer, je dünner die Trennlinien ausgeführt werden können. Zunächst war eine Linienstärke von 100  $\mu\text{m}$  umgesetzt worden, um die Felder effektiv elektrisch voneinander zu trennen. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass schon 50  $\mu\text{m}$  ausreichend sind. Neben der reduzierten optischen Wahrnehmbarkeit mindern die dünneren



■ Bild 5: Ansatzstelle Laser



**Bild 6:** Gegenüberstellung Messung Simulation

Trennlinien auch den negativen Einfluss auf die energietechnischen Eigenschaften, da bei 50  $\mu\text{m}$  Linienstärke folglich weniger Beschichtung entfernt werden müssen. Insgesamt werden dann nur ca. 3.5% der Beschichtung abgetragen. Vergleichsmessungen haben ergeben, dass sich die Energietransmission, gegenüber der nicht manipulierten Scheibe, um weniger als 2 Prozentpunkte und der Wärmedurchlass um weniger als 0,1  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  erhöhen.

#### 4 Simulation und Ausführung

Die zur Projektentwicklung des Velaro MS (DB Baureihe 408) gestellten Anforderungen unterscheiden sich gegenüber dem bereits im Betrieb befindlichen Nahverkehrszug RRR [5]. Der Kunde hat restriktivere Vorgaben zu Einstrahlwinkel und Polarisation formuliert, deren Notwendigkeit aus der hohen Geschwindigkeit resultieren. Zudem hat auch die Umsetzung des 5G-Mobilfunkstandards Berücksichtigung gefunden.

Bei der Lösungsfindung war die vom Siemens-eigenen Prüflabor „RFT Österreich“ durchgeführte Grundlagenforschung entscheidend. Für die Auslegung ist ein eigen entwickeltes, innovatives Simulationsprogramm genutzt worden. Hierdurch

konnten aufwendige Testreihen vermieden werden, da die Auswirkungen von geänderten Parametern mit deutlich geringerer Aufwand berechnet und bewertet werden konnten, bis das Optimum erreicht worden ist. Auf diese Weise konnten Kosten, aber vor allem auch wichtige Entwicklungszeit eingespart werden. Bei Messungen der Frequenzdruchlässigkeit mit den ersten Prototypen der neu entwickelten Seitenscheiben im hauseigenen Labor konnten die theoretische Auslegung schließlich bestätigt werden. Der Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigte bei verschiedenen Einstrahlwinkeln und Polarisationen eine gute Korrelation (Bild 6).

#### 5 Schlussbetrachtung

Die Vermessung der verbesserten mobilfunktransparenten Scheiben hat ergeben, dass über die Frequenzen zwischen 700 MHz und 3,8 GHz, die Dämpfung kleiner als 10 dB ist. Insbesondere bei den niedrigen 5G-Bändern, die den Bereich von 700 MHz belegen, konnte eine Dämpfung von weniger als 5 dB erreicht werden. Hierbei werden die energetischen Eigenschaften der Seitenscheibe in nur äußerst geringem Maße beeinträchtigt. Bei der Kosten-Nutzen-Betrachtung stehen,

neben der Anschaffung und dem Energieverbrauch der Intrain-Repeater, vor allem die hohen Kosten für deren Wartung den vergleichsweise geringen Mehrkosten für die mobilfunktransparenten Seitenfenster gegenüber. Auf dieser Grundlage ist von der Siemens Mobility GmbH die die Entscheidung getroffen worden, den Velaro MS mit mobilfunktransparenten Scheiben auszurüsten.

Dank dieser Entscheidung, ist in der neuen Generation der Hochgeschwindigkeitszüge, die ab Dezember 2022 für die Deutsche Bahn AG in Deutschland und in anderen Europäischen Ländern verkehren werden, ein nahezu ungehinderter Mobilfunkempfang möglich, sofern eine entsprechende Mobilfunkinfrastruktur vorhanden ist.

#733\_A5

(Bildnachweis: 1, 2 und 4, Siemens/Verfasser; 3, Glas Trösch; 5, Flachglas Wernberg GmbH; 6, Siemens/Lukas Mayer)

#### Literatur

- [1] Demel, H.: Irrweg oder Innovation – Thesen zum vernünftigen Umgang mit der U-Wert-Olympiade, Rosenheim 2015.
- [2] Gösele, K.: Berechnung der Schalldämmung von Fenstern (AZ: B15-800183), Leinfelden-Echterdingen 1983.
- [3] Kuhne, M.: Modellierung des Energietransports durch Verglasungen, Weimar 1997.
- [4] Glashandbuch, Glas Trösch GmbH – SANCO Beratung, 4. Auflage 2010.
- [5] Madjdi, M.; Mayer, L. W.; Demmer, A.: Hochfrequenz-durchlässige Fensterscheiben für Regional- und Fernverkehrszüge, ZEVrail, 140. Jahrgang, Heft 9, 2016, S. 376–383.



Dipl.-Ing. Michael Schmäcke (55). Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der Fachhochschule Aachen bis 1992. Seit 1996 bei der Siemens Mobility GmbH zuständig für Seitenverglasung von Zügen und vKAP nach DIN 6701.

Anschrift: Siemens Mobility GmbH, Duisburger Str. 145, 47829 Krefeld, Deutschland.

E-Mail: michael.schmaecke@siemens.com