



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

Erfahrungen aus der Beurteilung von lasergravierter Wärmeschutz- verglasung als Ersatz für Repeater auf Eisenbahnfahrzeuge

P-135: Schlussbericht

Markus Förster

SBB Schweizerische Bundesbahnen AG
Personenverkehr, Rollmaterialentwicklung Fernverkehr
Wylersstrasse 123, 3000 Bern 65
markus.foerster@sbb.ch, www.sbb.ch

Johannes Estermann

SBB Schweizerische Bundesbahnen AG
Personenverkehr, Energiesparprogramm
Wylersstrasse 125, 3000 Bern 65
johannes.estermann@sbb.ch, www.sbb.ch

Begleitgruppe

BAV: Tristan Chevroulet, Daniel Schaller (PO)

Impressum

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter
Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 135
Bezugsquelle
Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –
innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 18.05.2020

Inhalt

Zusammenfassung	4
1. Ausgangslage	5
2. Ziel der Arbeit	6
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand	6
4. Ergebnisse	7
4.1. HF-Eigenschaften.....	7
4.1.1. Messkampagne IC2000 vom 20./21. Juni 2017 sowie diverse Nachmessungen.....	7
4.1.2. Messfahrten IC2000 durch P3 Group (3. – 6. November 2017)	9
4.1.3. Messfahrten Domino (15. Dezember 2017)	9
4.1.4. Messfahrten ICN (25. August 2018).....	10
4.1.5. Messung der finale Serienscheiben im IC2020 - Pilotfahrzeug (8. Mai 2019).....	10
4.2. Klimatisierung und Energieverbrauch	11
4.2.1. Glasaufbau bei der SBB	11
4.2.2. Vergleich wärmephysikalischer Kennwerte.....	11
4.3. Kundenakzeptanz von laserbehandelten Fensterscheiben	13
4.4. Lebenszykluskosten	14
4.4.1. Auftrag ans Life Cycle Management der SBB.....	14
4.4.2. Varianten für Modernisierung IC2020	14
4.4.3. Parameter der Scheiben - Übersicht	16
4.4.4. Energiekosten.....	16
4.4.5. Qualitative und quantitative Erkenntnisse der LCC-Analyse.....	16
4.4.6. Empfehlung und Begründung.....	18
4.5. Aktuelle Marktsituation und Bahnbetreiber mit HF-Scheiben	18
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	19
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	19
Anhänge	20

Zusammenfassung

Dieses Projekt fasst die Erfahrungen der SBB anhand von „Good practice“ Beispielen zusammen, die aus der Beurteilung von lasergravierten Wärmeschutzfenstern, nachfolgend HF-Scheiben, als Ersatz für Mobilfunkverstärker, nachfolgend Repeater, in der Regional- und Fernverkehrsflotte entstanden sind. Die zahlreichen mit den Mobilfunkanbietern durchgeführten (Vergleichs-) Messungen auf unterschiedlichen Streckenabschnitten und mit verschiedenen Fahrzeugtypen ergeben, dass HF-Scheiben in den heute genutzten Frequenzbändern (800 – 2600 MHz) gleich gut oder besser als Repeater-Systeme abschneiden. Bezüglich der Einflüsse auf die Fahrzeugklimatisierung kann festgehalten werden, dass bei den getesteten Scheiben höhere Energieverluste ausgewiesen wurden wie bei konventionellen Scheiben. In der Gesamtbetrachtung werden diese Verluste aber durch den Wegfall des Energieverbrauchs der Repeater reduziert. Aus Life-Cycle Sicht schneiden bei allen untersuchten Fahrzeugen die HF-Scheiben im Vergleich zu Repeatern besser ab, da hier deutlich geringere Investitionskosten und reduzierte Instandhaltungskosten anfallen. Die Mehrkosten für die Laserbehandlung von HF-Scheiben, aktuell 20% - 50% je nach Hersteller und Scheibentyp, fallen bei der Betrachtung nicht allzu stark ins Gewicht. Mangels Langzeiterfahrungen können über das Alterungsverhalten der Scheiben derzeit nur Abschätzungen getroffen werden. Dieses Restrisiko wird durch Einfordern zusätzlicher Garantien der Lieferanten im Rahmen der Beschaffung abgedeckt. Aus Kundensicht ist eine möglichst feine, kaum sichtbare Laserstruktur anzustreben. Die durchgeführte qualitative Marktforschung kommt zum Schluss, dass die neuen Scheiben kaum störend wahrgenommen werden. Aufgrund der gesammelten Informationen werden die SBB bei zukünftigen Beschaffungs- und Modernisierungsprojekten prioritär HF-Scheiben statt Repeater fordern.



Abbildung 1: Modernisierte IC2000 Komposition mit Hochfrequenz (HF)-Scheiben.

1. Ausgangslage

Die heutige Mobilfunk-Lösung in den Zügen der SBB wird durch zwei Faktoren beeinflusst. Zum einen führte die seit Mitte der 90er Jahre kontinuierliche Zunahme von neuen Wagen und Zügen dazu, dass sich fast nur noch klimatisiertes Rollmaterial im Einsatz befindet. Zum andern stieg mit dem Siegeszug des Mobilfunks im gleichen Zeitraum das Bedürfnis der Kunden nach gutem Mobilfunkempfang im Zug.

Aufgrund der Wagenkastenbeschaffenheit und der Einführung von Fenstern mit metallisch bedampften Sonnenschutz-Beschichtung wirken die klimatisierten Fahrzeuge wie ein faradayscher Käfig (Abschirmung von elektro-magnetischen Feldern). Dies führt zu einer deutlichen Verminderung des Mobilfunkempfangs im Fahrzeuginnern und somit zu einer Verschlechterung des «Mobilfunkerlebnis».

Seit Ende der 90er Jahre arbeitet die SBB eng mit dem InTrainCom-Konsortium, bestehend aus Salt, Sunrise und Swisscom, zusammen. Das Konsortium und die SBB haben sich zum Ziel gesetzt, den Mobilfunkempfang in den Zügen zu verbessern. Der verfolgte Lösungsansatz beruht auf dem Einbau von Mobilfunkverstärkern (Repeatern) im Zug, welche den faradayschen Käfig überbrücken und somit dem Kunden erlauben von der guten Aussennetzabdeckung auch im Zug zu profitieren.

Die seit Anfang der 2000er Jahre realisierte Repeater-Lösung ist allerdings im Rollout auf die Fahrzeuge sehr zeitaufwendig, kostenintensiv und muss kontinuierlich auf den neusten Mobilfunkstandard (2G, 3G, 4G und 5G) sowie die angepasste Frequenznutzung (Refarming) angepasst werden. Gleichzeitig verlangen die Kunden aufgrund der Entwicklung bei den Kundenendgeräten nach immer mehr Datendurchsatz und somit besserer Performance der Repeater. Diese Dynamik und die schnell wechselnden Produktlebenszyklen im Mobilfunk stellen die SBB mit mehr als 4'000 anzupassenden Wagenkästen vor immer grössere Herausforderungen (Ausreihung der Fahrzeuge, längere Stillstandzeiten, höheres Gewicht, grösserer Energiebedarf der Repeater, Kosten, etc.).

Dynamik im Mobilfunkbereich und Beschaffung/Modernisierung Rollmaterial

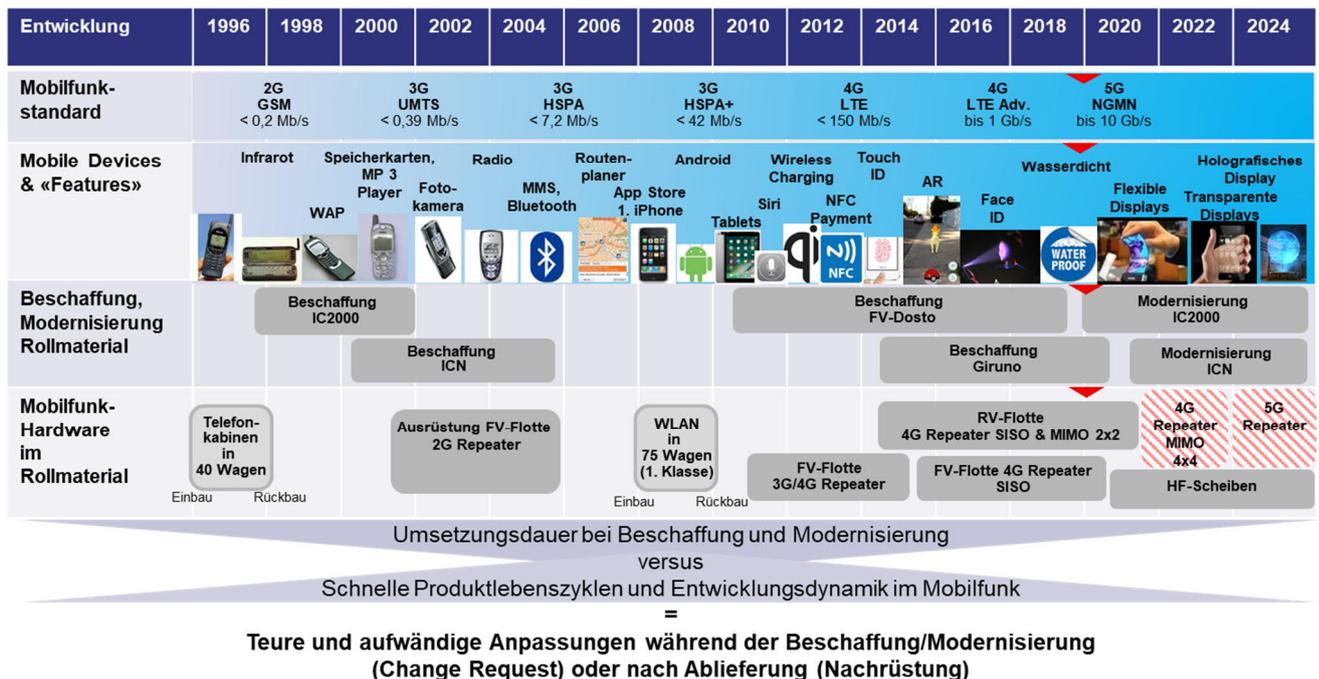


Abbildung 2: Quelle SBB

Mit dem Bekanntwerden der ersten (Labor-)Tests (Siemens Wien, EPFL und Swisscom) zum Thema «Mobilfunkdurchlässige Scheiben» wurden SBB und InTrainCom auf diesen neuen Lösungsansatz aufmerksam. Von Interesse war, ob lasergravierte Wärmeschutzfenster, nachfolgend HF-Scheiben, eine gleichwertige oder bessere Lösung für den Mobilfunkempfang im Zug sind als die verwendeten Repeater. Auch ein direkter Vergleich der Life-Cycle- und Energiekosten und dem damit verbundenen Einsparpotential war von Interesse. Haupttreiber der vertieften Prüfung von HF-Scheiben war nicht primär die mögliche Energieeinsparung, auch wenn diese einen positiven Nebeneffekt darstellt, sondern die Möglichkeit, zukünftig mit geringeren Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten eine gleichwertige oder sogar bessere Lösung anbieten zu können. Die Erwartung eine möglichst langlebige Lösung und passive Technologie einsetzen zu können, überwog.

2. Ziel der Arbeit

Mit den verschiedenen Test- und Prüfungsaktivitäten von HF-Scheiben soll herausgefunden werden, ob der Einsatz dieser Verglasungsprodukte als valabler Ersatz für Repeater verwendet werden kann. Die verschiedenen Tests und Prüfungen lassen sich in vier Themenschwerpunkte unterteilen:

1. Messung der Performance der Sprach- und Datenkommunikation im Vergleich zu Repeater-Systemen in unterschiedlichen Fahrzeugtypen. „Was kommt beim Kunden an“. Hierbei interessiert insbesondere das Kundenerlebnis „Connectivity“ (Sprach- und Datenkommunikation) im Zug bei SISO- oder MIMO-Repeatern, ohne Repeater oder mit HF-Scheiben.
2. Auswirkungen der lasergravierten Wärmeschutzverglasung auf die Klimatisierung der Fahrzeuge und den Energieverbrauch aufgrund veränderter g- und Ug-Werte durch die neue Verglasung gegenüber Bestandsverglasung.
3. Erstellung von Entscheidungsgrundlagen für Fahrzeugprojekte durch den Vergleich der Lebenszykluskosten von Repeater-Systemen mit HF-Scheiben.
4. Beurteilung der Aufenthaltsqualität mittels Kundenbefragungen zur Beurteilung von HF-Scheiben im fahrenden Zug.

Als Resultat dieser Abklärungen soll eine Empfehlung für oder gegen den Einsatz von HF-Scheiben als Ersatz für Repeater auf Eisenbahnfahrzeuge abgegeben werden. Zusätzlich soll bei einer positiven Beurteilung der Verglasung eine Spezifikation erarbeitet werden, welches bei zukünftigen Beschaffungsprojekten den Scheiben-Herstellern abgegeben werden soll.

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Bisher konzentrierten sich die Bemühungen den Kunden eine möglichst optimale Mobilfunkversorgung im Zug anbieten zu können, ausschliesslich auf den Einbau oder den Tausch von neuer aktiver und passiver Hardware (Dachantennen, Repeater, Switches, Strahlungskabel, etc.). Bei Fahrzeugneubeschaffungen und Modernisierungen wurde das HF-Engineering gemeinsam mit dem InTrainCom-Konsortium (Salt, Sunrise und Swisscom) jeweils pro Fahrzeugtyp festgelegt und umgesetzt.

Mit dem Aufkommen erster Lösungsansätze und Labortests von HF-Scheiben in den Jahren 2015 (Siemens Wien) und 2016 (EPFL & Swisscom) wurde das Interesse der SBB und des InTrainCom-Konsortiums an einer Überprüfung dieses Themas geweckt.

Neben der Mobilfunkdurchlässigkeit der Scheiben interessiert auch die Leistungsfähigkeit der modifizierten Scheiben im Vergleich zur aktuell eingesetzten Repeater-Technologie (SISO) und der zukünftig erweiterten Technologie (MIMO 2x2). Weitere wichtige Punkte aus SBB-Sicht sind das klimatechnische Abschneiden der modifizierten Scheibe (Veränderung bei den g- und Ug-Werten) im Vergleich zu bisher verwendeten Scheiben sowie die möglichen Kosteneinsparungen unter Betrachtung der Lebenszykluskosten. Durch den Vergleich verschiedener Fenster- und Repeater-Varianten mit Fokus auf das Modernisierungsprojekt IC2020 solle damit eine Entscheidungsgrundlage für einen Variantenentscheid geschaffen werden.

Letzter Punkt der Abklärungen war die Überprüfung der Kundenakzeptanz von mobilfunkdurchlässigen Scheiben. Dabei interessierte explizit die Wahrnehmung und Beurteilung der Rasterung, also rein das optische Erscheinungsbild beim Blick durch die Scheibe. Einschätzung der Performance (Mobilfunkempfang, Bandbreite, etc.) waren dabei nicht Gegenstand dieser Kundenbefragung.

4. Ergebnisse

4.1. HF-EIGENSCHAFTEN

Mittels verschiedener Messfahrten (Fahrzeugtyp und Strecken) soll das bestehende Repeater-System mit den HF-Scheiben verglichen werden. Alle Messungen wurden durch die drei Schweizer Mobilfunkanbieter (Salt, Sunrise und Swisscom) begleitet und mit Ausnahme der Messungen vom 20. und 21. Juni 2017 auch selbst durchgeführt. Die verwendeten Messsysteme der Mobilfunk Providern bestehen immer aus Kundenendgeräten mit entsprechender Mess-Software.

4.1.1. Messkampagne IC2000 vom 20./21. Juni 2017 sowie diverse Nachmessungen

Die aufwendigsten Vergleichsmessungen fanden am 20. und 21. Juni 2017 statt. Dabei kamen neben einem Fahrzeug mit SISO Repeater, auch zwei Prototypfahrzeuge (ein Fahrzeug mit Repeater MIMO 2x2 und ein Fahrzeug mit HF-Scheiben) zum Einsatz.

Fahrzeugtyp	Ausrüstung	UIC-Nummer	Messstrecke
IC2000 A	SISO-Repeater	50 85 1694 061 - 4	Brig – Bern – Basel – Bern
IC2000 A	MIMO-Repeater	50 85 1694 038 - 6	Brig – Bern – Basel – Bern
IC2000 A	HF-Prototypscheiben (0.2 mm)	50 85 1694 002 - 2	Brig – Bern – Basel – Bern

Es wurden zwei Messfahrten an zwei unterschiedlichen Tagen mit folgendem Setup durchgeführt:

Messfahrt 1. Tag vom 20. Juni 2017:

Vergleich MIMO-Repeater (Fahrzeug 2) mit HF-Scheiben (Fahrzeug 3) Strecke: Bern – (LBT) – Brig – Bern – (NBS) – Basel – (NBS) – Bern

Messfahrt 2. Tage vom 21. Juni 2017:

Vergleich SISO-Repeater (Fahrzeug 1) mit HF-Scheiben (Fahrzeug 3). Strecke: Bern – (LBT) – Brig – Bern – (NBS) – Basel – (NBS) – Bern

Der ganze Messzug setzte sich aus einer Re460, 3 A IC2000 (Fahrzeuge 1 – 3) und einem Steuerwagen IC Bt zusammen.

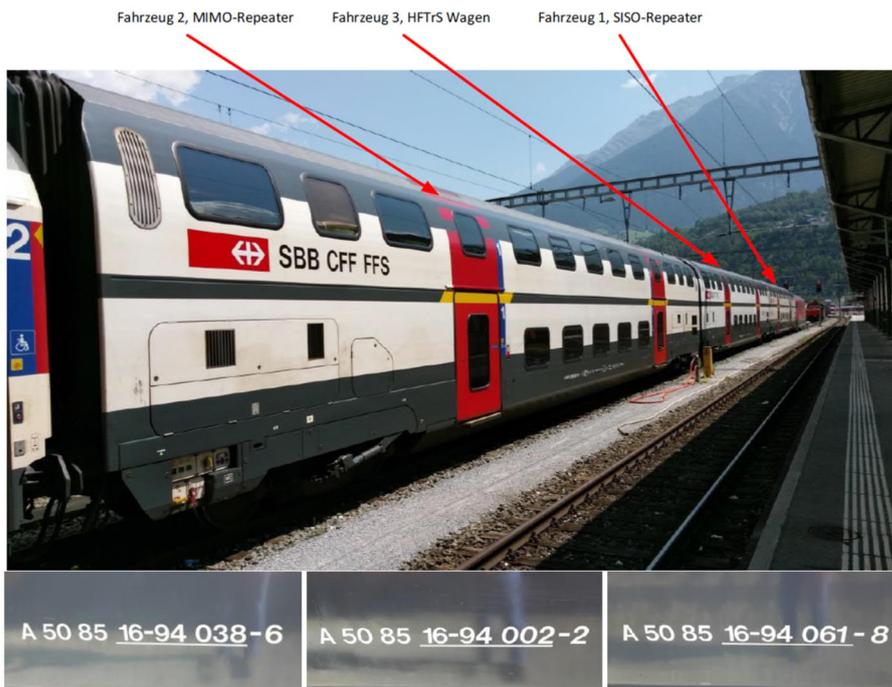


Abbildung 3: Messzug in Brig. Quelle: STRAPAG

Die befahrenen Streckenabschnitte entsprechen dem aktuellen und zukünftigen Einsatzgebiet des IC2000. Vorgesehen waren zwei Messaufbauten. Für die Messfahrt am ersten Tag sollten zwei identische Messaufbauten mit je 5 Smartphones und einem Scanner aufgebaut werden. Für die Messfahrt am zweiten Tag sollte ein Messaufbau mit 5 Smartphones und der zweite Messaufbau mit 5 Smartphones und zwei Scanner (1x Innen- und 1x Aussenantennen) aufgebaut werden.

Der Scanner 1 (Fahrzeug 3) hat nur am ersten Messtag auf dem Streckenabschnitt Bern – Brig funktioniert. Danach war die USB Buchse defekt. Der Rest der Messkampagne wurde mit einem Scanner gemessen. Am ersten Messtag wurde der Scanner im Fahrzeug 2 (MIMO-Repeater) belassen. Für den zweiten Messtag wurden abwechselnd mit Innen- und Aussenantennen im Fahrzeug 3 gemessen, so dass jeweils Hin- und Rückfahrt miteinander verglichen werden können.

Um während der Aufzeichnung auch in Gebieten ohne GPS-Empfang (Tunnel) möglichst genaue Geodaten zu erhalten, wurden zwei GPS Empfänger mit integriertem und kalibriertem Kreiselkompass verwendet. Zusammen mit dem angeschlossenen Weggeber konnte so eine ortsgenaue Aufzeichnung erfolgen.

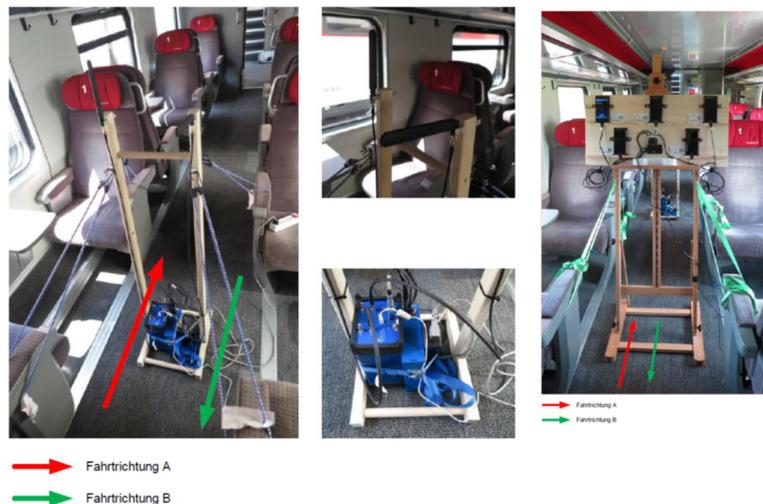


Abbildung 4: Messaufbau im Zug. Quelle: STRAPAG

Im Anschluss der Messungen vom 21. und 22. Juni 2017 wurden noch ein paar Nachmessungen zur Verifikation von offenen Punkten im regulären Betrieb zwischen Bern und Zürich HB durchgeführt. Die Fahrzeuge (1-3) verkehrten noch eine Weile gemeinsam zwischen Bern und Zürich HB (Umlauf 716).

Fazit der Vergleichsmessungen SISO-/MIMO-Repeater/HF-Scheiben:

- Das Kundenerlebnis Mobilfunkempfang im Wagen mit HF-Scheiben ist mit einem MIMO 2x2 Repeater-setup vergleichbar.
- Der Datendurchsatz im Up- und Downlink der HF-Scheiben ist vergleichbar oder sogar besser als der MIMO 2x2 Repeater.
- Der SISO-Repeater (aktueller Ausrüstungsstand) ist deutlich schlechter als HF-Scheiben oder MIMO 2x2.
- Die MIMO-Verwendung ist bei HF-Scheiben höher als im MIMO-Repeaterwagen.
- Die Signalqualität aller drei getesteten Systeme ist vergleichbar (SISO, MIMO, HF-Scheiben).
- Der Empfangspegel ist bei HF-Scheiben tiefer als bei beiden Repeatervarianten. Dies hat jedoch auf das Kundenerlebnis Mobilfunkempfang keinen Einfluss.
- Eine erhöhte Anzahl von Gesprächsabbrüchen ist bei HF-Scheiben nicht nachweisbar (CS und VoLTE).

Aufgrund der Ergebnisse der Vergleichsmessungen wurde der Einsatz von HF-Scheiben im Modernisierungsprojekt der IC2000 Wagen empfohlen. Im Weiteren wurde die Überprüfung der Flotten Domino und ICN beschlossen.

4.1.2. Messfahrten IC2000 durch P3 Group (3. – 6. November 2017)

Um die Messresultate von einer dritten unabhängigen Stelle zu überprüfen, wurde die P3 Group mit einer Vergleichsmessung beauftragt. Die Messungen erfolgten im Regelverkehr zwischen Zürich und Bern mittel Kundenendgeräten. Während der Messung waren alle Fahrzeuge in der gleichen Komposition eingereicht, sodass direkte Vergleichsmessungen möglich waren. Auch im Unter- und Oberdeck wurden Vergleichsmessungen durchgeführt.

Fahrzeugtyp	Ausrüstung	UIC-Nummer	Messstrecke
IC2000 A	SISO-Repeater	50 85 1694 061 - 4	Bern – Zürich HB
IC2000 A	MIMO-Repeater	50 85 1694 038 - 6	Bern – Zürich HB
IC2000 A	Prototypscheiben (0.2 mm)	50 85 1694 002 - 2	Bern – Zürich HB

Die durchgeführten Messungen bestätigten mehrheitlich die bereits am 20. und 21. Juni 2017 durch InTrainCom gemachten Aussagen:

- Die beiden Repeaterwagen zeigen zwar bessere Empfangswerte, bei Download Datendiensten bieten die HF-Scheiben jedoch ein klar besseres Nutzererlebnis.
- Trotz der besseren Empfangswerte ist Data Performance nicht für alle Dienste in Repeaterwagen besser.
- Das Stockwerk (Unter- oder Oberdeck) der Wagen scheint bei der Performance nicht von erhöhter Relevanz zu sein.
- Es sind Unterschiede zwischen Download und Upload Services erkennbar. HF-Scheiben haben eindeutig Vorteile gegenüber Repeatern bei Download, Internetbrowsing oder Streamingdiensten, wo hingegen bei Upload die Repeaterlösungen im Vorteil sind. Repeater mit MIMO-Technologie haben Vorteile gegenüber SISO-Repeatern.
- Bei den Voice Services sind keine signifikanten Unterschiede zwischen HF-Scheiben oder Repeatern zu erkennen.

4.1.3. Messfahrten Domino (15. Dezember 2017)

Auf dem Streckenabschnitt Lausanne – Neuchâtel wurden mehrere Messfahrten durchgeführt. Da zu diesem Zeitpunkt nur etwa 20% alle Dominos über SiSO-Repeater verfügten, wurden die Vergleichsmessungen zwischen HF-Scheiben und Standardscheiben durchgeführt. Der Testzug (94 85 7 560 217-2) bestand aus einem Steuer- (ABt) und einem Mittelwagen (INOVA), beide mit Standardscheiben und einen Triebwagen (RBDe) mit HF-Scheiben.

Fahrzeugtyp	Ausrüstung	UIC-Nummer	Messstrecke
RBDe	Prototypscheiben (0.02 mm)	94 85 7 560 217-2	Lausanne – Neuchâtel
INOVA	Standardscheiben		Lausanne – Neuchâtel
Abt	Standardscheiben		Lausanne – Neuchâtel

Es wurde mit verschiedenen Kundenendgeräten gemessen, um das Kundenerlebnis Mobilfunkempfang zu prüfen. Alle drei Mobilfunkprovider führten die Messungen mit folgendem Ergebnis durch:

- HF-Scheiben ermöglichen höhere Signalpegel.
- HF-Scheiben ermöglichen besseres Signal-Rauschverhältnis.
- HF-Scheiben ermöglichen eine bessere End-to-End Qualität.
- HF-Scheiben ermöglichen höhere Datenraten, insbesondere auch im Uplink.
- Über alles gesehen, ist der Mobilfunkempfang mit HF-Scheiben deutlich besser als mit Standardscheiben.

Aufgrund der durchgeführten Messungen wurde entschieden, dass die Domino-Flotte mit HF-Scheiben statt mit Repeater (SISO) ausgerüstet wird. Die bereits mit Repeater ausgerüsteten Fahrzeuge der Domino-Flotte werden nicht nachträglich mit HF-Scheiben ausgerüstet.

4.1.4. Messfahrten ICN (25. August 2018)

Für die geplante Modernisierung der ICN-Flotte wurde ein Wagen (Bt) einer ICN-Komposition (500 027) mit HF-Scheiben (0.05mm) ausgerüstet. Dabei wurde das bestehende Repeater-System im relevanten Wagen abgeschaltet bzw. abgekoppelt. Die Messfahrten wurden auf dem Streckenabschnitt Lausanne – Neuchâtel durchgeführt wobei abwechselnd im Wagen mit HF-Scheiben und im Wagen mit Repeater gemessen wurde. Wiederum haben alle drei Provider mit mehreren Kundenendgeräten an den Messungen teilgenommen.

Fahrzeugtyp	Ausrüstung	UIC-Nummer	Messstrecke
ICN	Prototypscheiben (0.05mm)	500 027	Lausanne - Neuchâtel

Folgendes Fazit wurde nach der Auswertung der Messfahrten (6 Fahrten) gezogen:

- Die HF-Scheiben stellen eine gute Alternative zu einer Repeaterausrüstung der Fahrzeuge dar.
- Die gemessene Feldstärke ist frequenzabhängig 10-12 dB tiefer als bei einem optimal funktionierenden Repeater-System. Dies hat aber keinen Einfluss auf das Kundenerlebnis, da die Gebiete entlang der Bahnstrecken durch die Mobilfunkanbieter gut abgedeckt sind.
- Die Empfangsqualität ist gleich oder besser als bei einem Repeatersystem.
- Der Datendurchsatz im Down- und Upload ist gleich oder besser als bei einem Repeatersystem.
- Die Anzahl Gesprächsabbrüche ist mit HF-Scheiben identisch wie bei einem Repeatersystem.

Fazit: Es wird empfohlen, als Ersatz für die SISO-Repeater auf dem ICN HF-Scheiben einzubauen.

4.1.5. Messung der finale Serienscheiben im IC2020 - Pilotfahrzeug (8. Mai 2019)

Ziel der Messungen war es, dass finale Serienprodukt der HF-Scheiben zu verifizieren und eine formelle Freigabe für den Umbau der IC2000 Wagen geben zu können. Mit verschiedenen Endgeräten wurde das Mobilfunkerlebnis auf der Strecke Olten – Zürich – Romanshorn – Zürich gemessen und bewertet. Jeder Mobilfunkprovider hat seine eigenen Messungen durchgeführt und ausgewertet.

Fahrzeugtyp	Ausrüstung	UIC-Nummer	Messstrecke
IC2020 A	HF-Scheiben in serienqualität (0.05mm)	50 85 16-94 021-2	Zürich HB - Romanshorn

Das finale Statement von InTrainCom nach den Messungen:

- Es gibt leichte Unterschiede zwischen Unterdeck und Oberdeck. Der Datendurchsatz ist im Oberdeck leicht besser.
- Der Empfang über die gesamte Strecke ist gut. Selbst bei schwächerem Aussensignal dringt noch genügend Feldstärke in den Fahrgastraum.
- Die verwendeten Scheiben mit 0.05 mm Linienstärke zeigen eine zum Repeater vergleichbare Performance in allen aktuell genutzten Frequenzbändern (800/900/1800/2100/2600MHz).
- Die 5G-Tauglichkeit in den aktuell genutzten Frequenzbändern ist gestützt auf 4G-Messungen und die Verwandtschaft zwischen den 4G- und 5G-Signalen gewährleistet.

InTrainCom gibt somit den Rollout aus HF-technischer Sicht und auch aus Kundensicht «Connectivity» für die gewählten HF-Scheiben (0.05 mm Laserung) frei.

Gesamtfazit:

Die in den Fahrzeugtypen Domino und ICN durchgeführten Messungen bestätigen die Resultate der Vergleichsmessungen im IC2000 (SISO-Repeater, MIMO-Repeater und mobilfunkdurchlässige Verglasung). Die HF-Scheiben sind vereinfacht gesagt gleichgut oder sogar besser als ein Repeatersystem. Die SBB und InTrainCom werden aufgrund der breiten Datenbasis bei zukünftigen Neubeschaffungen und Modernisierungen primär auf die passive Technologie der HF-Scheiben setzen.

Aufgrund der Bestätigung der Resultate bei der einstöckigen Flotte (Domino und ICN) werden vorerst keine weiteren Messungen durchgeführt. Für die weiteren zur Nachrüstung vorgesehenen Fahrzeugtypen EW IV, EC und IC Bt werden somit vor der Ausschreibung keine Pilotfahrzeuge für Vergleichsmessungen von HF-Scheiben und Repeatern gebaut. Es erfolgt eine direkte Ausschreibung mit HF-Scheiben auf Basis einer detaillierten Spezifikation.

4.2. KLIMATISIERUNG UND ENERGIEVERBRAUCH

4.2.1. Glasaufbau bei der SBB

Der Glasaufbau für Aussenfenster von Fahrzeugen wird bei der SBB in zwei Dokumenten spezifiziert. Zum einen ist dies die «Technische Regel Aussenfenster für Reisezugwagen und Triebzüge» (BCA 20003476) zum andern die «Technische Regel Wärme-, lichttechnische und akustische Prüfung von Verglasungspaketen» (BCA 20152066). Ergänzend wurde im Rahmen dieser Arbeit ein weiteres Regelwerk für die Definition der HF-Eigenschaften von Scheiben gemeinsam mit InTrainCom definiert. Dieses wird zukünftigen Ausschreibungen beigelegt. Weiter hat man sich innerhalb der SBB auf den Grundsatz geeinigt, dass bei Nachrüstungen der Glasaufbau unverändert bleiben soll um weitere Risiken zu vermeiden.

Das Isolierglas für Aussenfenster besteht auf der Aussenseite aus Verbund-Sicherheitsglas (VSG), auf der Innenseite aus Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG). Die Einzelgläser im VSG können bei der SBB für Festfenster aus Floatglas bestehen, für Notausstiegsfenster besteht das VSG zwingend aus ESG. Die Gesamt-Gladdicken pro Scheibe variiert zwischen 11 und 15 mm je nach Scheibentyp. Das VSG ist auf der Innenseite mit einer Sonnenschutzbeschichtung ausgeführt (metallisch bedampft) sodass von aussen einfallende Infrarot-Strahlung reflektiert wird. Der tatsächliche Aufbau eines Fensters und die Zusammensetzung der metallischen Bedampfung sind je nach Hersteller unterschiedlich und unterliegen dem «Know-how» der Lieferanten.

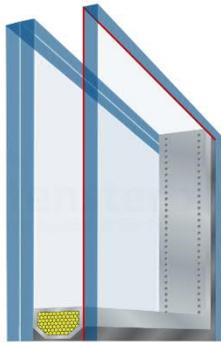


Abbildung 6: Querschnitt Fenster mit VSG und ESG.
Quelle: fensterblick.de

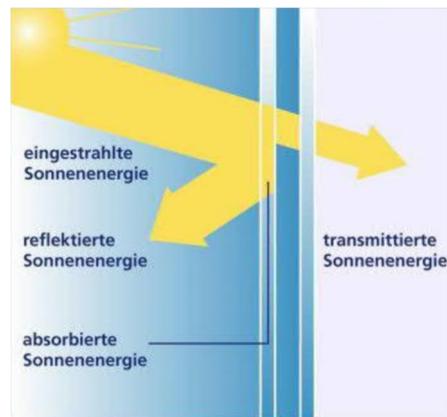


Abbildung 7: Wirkungsprinzip zweifach Sonnenschutzverglasung
Quelle: fensterfinder.de / Grafik: Interpane

Alle Glaskanten sind gesäumt und weisen je nach Scheibentyp einen zusätzlichen Kantenschutz auf.

Im Fokus der Überprüfung des Energieverbrauchs lagen neben dem Scheibenaufbau die Modifikation der Wärmeschutzbeschichtung mittels Laser durch die Scheibenhersteller. Konkret wurde die Wärmeschutzbeschichtung perforiert, also entlang von Linien unterbrochen. Je nach Hersteller werden unterschiedliche Strukturen (Quadrate, Waben, etc.) und unterschiedliche Linienbreite der Laserung (von 0,2mm bis 0.02mm) verwendet.

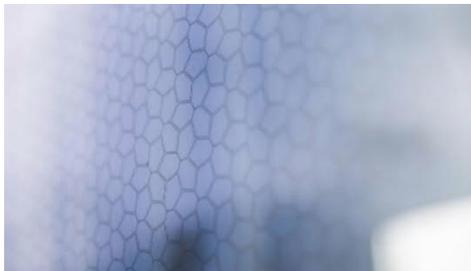


Abbildung 8: Fenster mit wabenförmiger Strukturierung der Wärmeschutzbeschichtung. Quelle: RRR.de
Abbildung 9: Fenster mit rechteckiger Strukturierung. Quelle: SBB

4.2.2. Vergleich wärmephysikalischer Kennwerte

Die wichtigsten Kriterien zur Überprüfung der wärmephysikalischen Kennwerte sind der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert), der Wärmedurchgangskoeffizient (Ug-Wert) sowie die Lichttransmission (LT). Der Gesamtenergiedurchlassgrad «g» kann Werte zwischen $g = 0$ und 1 annehmen. Ein g-Wert von 0,4 gibt z.B. an, dass 40% der Wärmestromdichte der Sonne durchgelassen wird. Je tiefer der g-Wert desto weniger Sonnenstrahlungsanteil muss durch die Klimaanlage im Rahmen des Kühlprozesses abgeführt werden, d.h. kleiner g-Wert geringerer Energieaufwand der Klimatisierung. Je tiefer der

Ug-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) ist, desto geringer ist der Wärmeverlust des Verglasungspaketes und somit der Energieanteil, der durch die Heizung im Fahrzeug kompensiert werden muss. Die Laserperforation spielt bei Beurteilung des Ug-Werts keine Rolle. Hingegen ist die Art des verwendeten Mediums im Zwischenraum der inneren und äusseren Verglasung sowie deren Zeitstandverhalten von grosser Bedeutung auf den Ug-Wert. Neben vakuumierten Lösungen werden üblicherweise Edelgase, wie Argon, Krypton im Scheibenzwischenraum angewendet.

Lichttransmission: Der Lichttransmissionsgrad einer Verglasung bezeichnet den prozentualen Anteil der Sonnenstrahlung im Bereich des sichtbaren Lichtes, welcher übertragen wird. Sonnenschutzgläser besitzen, je nach Wirkungsgrad, eine Lichtdurchlässigkeit zwischen 40 und 70 %. Je höher der Prozentsatz, desto lichtdurchlässiger das Fenster und somit «heller» der Raum bei Tageslicht. Die durch den Glashersteller angegebenen Werte bei Lichttransmission, g- und Ug-Werten sind bei der Beschaffung /Ausschreibung messtechnisch nachzuweisen und zu dokumentieren. Hierfür existieren verschiedene Normen.

Auch HF-Scheiben sollen somit idealerweise tiefe Werte beim g- und Ug-Wert aufweisen. Ein Vergleich zwischen den noch verbauten Scheiben der Erstausrüstung und den neuen laserperforierten Verglasungen beim IC2020 ergibt folgendes Bild:

Verglasungs-Variante		Erstausrüstung «Normalverglasung» IC2000	HF-Scheiben mit 0.05mm Laserung	
			Oberdeck	Unterdeck
U-Wert	[W/m ² K]	1.8	1.4	1.4
g-wert	[%]	39	41	41
Lichttransmission	[%]	51	61	61
Fensterflächen				
Oberdeck Sonnenseite	[m ²]	12.6	12.6	
Unterdeck Sonnenseite	[m ²]	4.8		4.8
Türen Sonnenseite	[m ²]	0.8		0.8
Oberdeck abgewandt	[m ²]	12.6	12.6	
Unterdeck abgewandt	[m ²]	4.8		4.8
Türen abgewandt	[m ²]	0.8		0.8
Spezifische Wärmestromdichte Sonne direkt	[W/m ²]	606	606	606
Spezifische Wärmestromdichte Sonne diffus	[W/m ²]	30	30	30
Raumlufttemperatur	[°C]	26	26	26
Aussenlufttemperatur	[°C]	32	32	32
Äusserer Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]	13	13	13
Innerer Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]	9	9	9
Transmission	[kW]	1381	759	339
Sonneneinstrahlung	[kW]	5417	3899	1740
Teilsomme			4658	2079
Summe Transmission + Strahlung	[kW]	6798	6737	

Abbildung 10: Vergleich Verglasungsvarianten Erstausrüstung versus Modernisierung (HF-Scheibe). Quelle: SBB.

Der Vergleich des Ablieferzustands der Verglasung (Erstausrüstung) zu den Messwerten der im IC2020 vorgesehenen Verglasungen für einen sommerlichen Betriebspunkt zeigt einen leicht geringeren Wärmeeintrag im Neuzustand der Verglasungen. Trotz leicht grösserem g-Wert der laserperforierten Verglasung wird dies insbesondere durch den tieferen Ug-Wert des laserperforierten Verglasungspaketes im Vergleich zur Erstablieferung erreicht. Das Alterungsverhalten der mit Argon gefüllten laserperforierten Verglasungspakete (Entweichen, Zeitstandverhalten der Argon-Füllung) kann nicht beurteilt werden und wird als Risiko im Life-Cycle eingestuft. Eine Absicherung der Langzeitr Risiken erfolgte durch Einfordern zusätzlicher Garantien im Rahmen der Beschaffung.

4.3. KUNDENAKZEPTANZ VON LASERBEHANDELTEN FENSTERSCHEIBEN

Der Kundenakzeptanz kommt bei dieser Neuerung eine grosse Bedeutung zu, schliesslich sollen die Veränderungen im unmittelbaren Sichtfeld der Kunden umgesetzt werden. Aus diesem Grund wurde mit dem ersten HF-Scheiben Prototyp des IC2000 eine Befragung im fahrenden Zug in Auftrag gegeben.

Die Befragungen wurde durch ein unabhängiges und neutrales Markforschungsinstitut im August 2017 während des kommerziellen Einsatzes durchgeführt (2 Gruppeninterviews). Der Prototyp-Wagen (IC2000, 1. Klasse, Unterdeck) verfügte über Musterscheiben mit einer breiten, relativ gut sichtbaren Laserung (0.2 mm). Für die SBB waren folgende Punkte von Interesse:

- Bemerkt der Kunde während der Reise eine Veränderung an den Scheiben? Was konkret? Wann macht sich dies als Störung bemerkbar? Wie klassifiziert der Kunde die Störung?
- Wie klassifiziert der Kunde diese Störung, wenn er weiss, dass sich dadurch die Mobilfunkverbindung im Zug verbessert?

Das Institut führte das Thema für die beiden Gruppen während der Reise in drei Phasen ein. Zuerst ungestützt, mit dem Thema Aufenthaltsqualität und der Frage: «Was macht aus Kundensicht den Reisekomfort während einer Zugreise aus?». Anschliessend wurden die Fahrgäste konkret auf die laserbehandelten Scheiben aber nicht auf deren konkreten Nutzen hingewiesen. In einem dritten und letzten Schritt erfolgte der Hinweis auf den konkreten Nutzen Scheiben.

Nach der Information an die Teilnehmer über Veränderungen an den Scheiben wurde das Raster in den Scheiben durch die Probanden erkannt. Zusätzlich wurden Veränderungen am Aufbau der Scheibe diskutiert. Die neuen Scheiben wurden ohne Kenntnis des Nutzens mehrheitlich neutral bis positiv beurteilt, da die Veränderungen kaum bemerkt wurden.

Durch die zusätzliche Information über den Nutzen der neuen Scheiben blieb die Beurteilung ähnlich. Allerdings führten gewisse unklare Punkte bezüglich der neuen Scheiben (Ökologie, Kosten, Einfluss auf Gesundheit) zu einer gewissen Skepsis. Das Institut sieht dies aber als Rationalisierung, die durch die Testsituation entstanden ist. Im Normalfall werden die neuen Scheiben kaum auffallen oder hinterfragt werden.

Obwohl die Beurteilung des SBB Versuchs entgegen den Erwartungen der SBB neutral bis positiv ausfiel, zieht die SBB in kommenden Ausschreibungen eine möglichst feine, kaum sichtbare Gravur vor.

Für zukünftige Scheibenbeschaffungen mit Lasergravur wurden folgende Anforderungen definiert:

- Die geometrische Form und Grösse sämtlicher unbearbeiteten Flächen (zwischen den gelaserten Linien) soll identisch sein.
- Die Linienbreite des bearbeiteten Bereichs (gelaserte Linie) darf max 0.05 mm betragen. Die Formtoleranz Geradheit beträgt maximal 20% der Breite des bearbeiteten Bereichs.
- Die bearbeiteten Bereiche verlaufen kontinuierlich und ohne Unterbruch über die ganze Scheibe bis an die Glaskante. Ein Versatz der weggelaserten Bereiche und Linien (z.B. durch Verschieben der zu lasernden Scheibe) soll nicht vorkommen.
- Der Mindestabstand zwischen parallelen weggelaserten Bereichen (einzelne gelaserte Linie) soll mindestens 1mm betragen.
- Die Mindestbreite jedes einzelnen, unbearbeiteten Bereichs soll die Fläche von 2.5 mm² nicht überschreiten.

Die Herausforderung bei zukünftigen Ausschreibungen liegt in der Gewichtung und Bewertung dieser Anforderungen. Der Kundenaspekt «optische Erscheinung resp. Nichterscheinung» der Lasergravur muss gleich stark gewichtet werden wie die Aspekte Kosten, HF-Eigenschaften und Klimatisierung/Energieverbrauch und darf im Endeffekt nicht zur Beeinträchtigung der Aufenthaltsqualität im Zug führen.

4.4. LEBENSZYKLUSKOSTEN

Durch den Vergleich der Lebenszykluskosten von verschiedenen Ausstattungsvarianten (Repeater- und HF-Scheiben) soll eine Entscheidungsgrundlage bezüglich der neuen HF-Scheiben geschaffen werden.

Folgende Kosten wurden für der LCC-Betrachtung zusammengeführt: Investitionen und Erneuerung inkl. Teuerung, Instandhaltungskosten inkl. Teuerung sowie Energieverbrauch (Wärmeeintrag und -Verluste durch die Scheiben versus Energieverbrauch der Repeater).

Nachfolgend wird dies anhand des Modernisierungsprojekts IC2020 aufgezeigt. Beim Modernisierungsprojekt stand ein Upgrade des aktuellen Repeater-Systems (SISO) auf eine neue, leistungsfähigere Repeaterversion (MIMO 2x2) oder der Einsatz von HF-Scheiben bei gleichzeitigem Rückbau des alten Repeatersystems zur Auswahl.

Alle Wagen der IC2000-Flotte verkehren mehrheitlich noch mit den Scheiben der Erstausrüstung. Nur die Notausstiegsfenster wurden zwischen 2013 bis 2018 gewechselt und befinden sich in einem guten Zustand.

4.4.1. Auftrag ans Life Cycle Management der SBB

- Entscheidungsgrundlage für den IC2020 erarbeiten durch Vergleich der verschiedenen Fensterersatz-Lösungsvarianten unter Betrachtung der Lebenszykluskosten über 27 Jahre (Restlebensdauer der Fahrzeuge bis 2043).
- Berücksichtigung der massgeblichen Kostentreiber:
 - Investitionen und Erneuerungen inkl. Teuerung
 - Investitionen Fensterersatz
 - Einbau der Fenster durch die SBB
 - Instandhaltungskosten inkl. Teuerung
 - Stromverbrauch (Energiefluss oder -Verlust durch die Scheiben versus Energieverbrauch des Repeaters)
- Rahmenbedingungen:
 - Teuerungsrate (gemäss SBB-Vorgaben):

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023ff
0.2%	0.6%	0.8%	1.0%	1.0%	1.0%	1.5%
 - Kalkulationszinsfuss 1.78%

4.4.2. Varianten für Modernisierung IC2020

Für den Vergleich der Lebenszykluskosten «Mobilfunkempfang im Zug» im Modernisierungsprojekt IC2020 wurden fünf verschiedenen Lösungsvarianten begutachtet und berechnet:

Variante 1	Repeater-Anpassungen und Fensterersatz mit «Luftfüllung» – ohne Tausch Notausstieg Fenster
Werte	<ul style="list-style-type: none"> • Ug-Wert 1,6 (W/m²K), g-Wert = 0,35
Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Alle Fenster, ausschliesslich Notausstieg-Fenster, werden ersetzt • Einfluss des g-Faktors (Gesamtenergiedurchlassgrad) berücksichtigt: g-Wert = 0,35 • Notausstieg-Fenster sind alle neu und werden nicht getauscht • Repeater Upgrade (MIMO 2x2) wird durchgeführt • Repeater Leistung 700 W • Tausch aller Scheiben im restlichen Lifecycle eingerechnet • Tausch aller Repeater nach 10 Jahren (Obsoleszenz)

Variante 2	Fensterersatz HF-Scheiben mit «Edelgasfüllung» - 100% Fensterersatz
Werte	<ul style="list-style-type: none"> Ug-Wert 1,4 (W/m²K), g-Wert = 0,41
Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> Alle Fenster werden ersetzt Einfluss des g-Faktors (Gesamtenergiedurchlassgrad) berücksichtigt: g-Wert = 0,41 Repeater Rückbau während der Modernisierung Kosteneinsparung durch Wegfall Repeater Wartungsverträge (z.Z. bei InTrainCom) Tausch aller Scheiben im restlichen Lifecycle eingerechnet

Variante 3	Fensterersatz HF-Scheiben mit «Edelgasfüllung» - ohne Tausch Notausstieg Fenster
Werte	<ul style="list-style-type: none"> Ug-Wert 1,4 (W/m²K), g-Wert = 0,41
Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> Alle Fenster, ausschliesslich Notausstieg-Fenster, werden ersetzt Einfluss des g-Faktors (Gesamtenergiedurchlassgrad) berücksichtigt: g-Wert = 0,41 Notausstieg-Fenster sind alle neu und werden nicht getauscht Repeater Rückbau während der Modernisierung Kosteneinsparung durch Wegfall Repeater Wartungsverträge (z.Z. bei InTrainCom) Tausch aller Scheiben im restlichen Lifecycle eingerechnet

Variante 4	Repeater-Anpassung und Fensterersatz mit «Edelgasfüllung» - 100% Fensterersatz
Werte	<ul style="list-style-type: none"> Ug-Wert 1,2 (W/m²K), g-Wert = 0,35
Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> Alle Fenster werden ersetzt Einfluss des g-Faktors (Gesamtenergiedurchlassgrad) berücksichtigt: g-Wert = 0,35 Repeater Upgrade (MIMO 2x2) wird durchgeführt Repeater Leistung 700 W Tausch aller Scheiben im restlichen Lifecycle eingerechnet Tausch aller Repeater nach 10 Jahren (Obsoleszenz)

Variante 5	Repeater-Anpassung und Fensterersatz mit «Edelgasfüllung» – ohne Tausch Notausstieg Fenster
Werte	<ul style="list-style-type: none"> Ug-Wert 1,2 (W/m²K), g-Wert = 0,35
Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> Alle Fenster, ausschliesslich der Notausstieg-Fenster, werden ersetzt Einfluss des g-Faktors (Gesamtenergiedurchlassgrad) berücksichtigt: g-Wert = 0,35 Notausstieg-Fenster sind alle neu und werden nicht getauscht Repeater Upgrade (MIMO 2x2) wird durchgeführt Repeater Leistung 700 W Tausch aller Scheiben im restlichen Lifecycle eingerechnet Tausch aller Repeater nach 10 Jahren (Obsoleszenz)

Annahmen für alle Varianten:

Instandhaltung:

Ab 2030 wird wegen der angegebenen Lebensdauer der HF-Scheiben mit einem kompletten Tausch der Scheiben gerechnet. Die Kosten werden über eine exponentielle Verteilung über 10 Jahre verteilt. Bei den Materialkosten werden nur die Scheiben gerechnet.

4.4.3. Parameter der Scheiben - Übersicht

Scheibentyp	Ug-Wert	g-Wert	Fensterfüllung / Laserung		
			Luft	Edelgas	Gelaset
Scheiben Erstausrüstung (vor Modernisierung)	1.8	0.39	X		
Neuscheibe mit «Luftfüllung» Variante 1	1.6	0.35	X		
HF-Scheibe mit «Edelgasfüllung» Varianten 2 und 3	1.4	0.41		X	X
Neuscheibe mit «Edelgasfüllung» Varianten 4 und 5	1.2	0.35		X	

4.4.4. Energiekosten

Zur Ermittlung der Energiekosten werden folgende Annahmen getroffen:

Bei den Varianten (1, 4 und 5) mit Repeater-Anpassungen (MIMO 2x2) wurde ein Energieverbrauch pro Repeater von 700 W berücksichtigt.

Bei den unterschiedlichen Varianten gibt es leichte Einsparung betreffend der Fenster, da die Fenstertypen Wärmedurchgangskoeffizient von $U_g = 1,2$ bis $1,8$ [W/m²K] haben.

Die Sonneneinstrahlung durch die Fenster wird durch Sonnenschutzvorrichtungen reduziert um die erforderliche maximale Kühlleistung zu verringern. Der Einfluss des g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad) wurde dabei neu berücksichtigt, wie folgt:

- g-Faktor (Luftfüllung neu) = 0.35
- g-Faktor (Luftfüllung aktuell) = 0.39
- g-Faktor (Edelgasfüllung) = 0.35
- g-Faktor (gelaserte Scheiben) = 0.41
- Leistungsfaktor Kälteanlage = 1.5 (Mittlerer Leistungsfaktor aus Teillast und Vollast Situation) Sommer/Winter
- Wärmestromdichte der Sonneneinstrahlung auf die Seitenwand

4.4.5. Qualitative und quantitative Erkenntnisse der LCC-Analyse

Variante 1	Repeater-Anpassungen und Fensterersatz mit «Luftfüllung» – ohne Tausch Notausstieg Fenster	
	Pro (+)	Contra (-)
	Neuverglasung mit Ug-Wert 1,6	Hohe Instandhaltungskosten im Lifecycle
		Hohe Investitionskosten durch Repeater-Anpassungen (MIMO 2x2)
		Hohe Zusatzkosten durch Repeater Ersatz nach 10 Jahren (Obsoleszenz)
		Energie LCC = 324 GWh

Variante 2		Fensterersatz HF-Scheiben mit «Edelgasfüllung» - 100% Fensterersatz	
	Pro (+)	Contra (-)	
	Neue gelaserte Fenster mit Ug-Wert 1.6	Einmalige Investitionskosten (HF-Scheiben)	
	Energie- und Gewichtseinsparung durch Verzicht/Ausbau Repeater-System	Aufwand Repeater-Rückbau	
	Wegfall Unterhaltskosten für Repeater	Mehrverbrauch Energie durch Kühlleistung im Sommer (g-Faktor = 0.41)	
	Komfortsteigerung Kunden	Energie LCC = 334 GWh (+ 10 GWh gegenüber Variante 1)	
	LCC Gesamtkostenersparnis gegenüber Variante 1 = 15.6 MCHF	LCC Mehrkosten für Energie 1.3 MCHF gegenüber Variante 1	
Variante 3		Fensterersatz HF-Scheiben mit «Edelgasfüllung» - ohne Tausch Notausstieg Fenster	
	Pro (+)	Contra (-)	
	Neue gelaserte Fenster mit Ug-Wert 1.6	Einmalige Investitionskosten (HF-Scheiben)	
	Energie- und Gewichtseinsparung durch Verzicht/Ausbau Repeater-System	Aufwand Repeater-Rückbau	
	Wegfall Unterhaltskosten für Repeater	Mehrverbrauch Energie durch Kühlleistung im Sommer (g-Faktor = 0.41)	
	LCC Gesamtkostenersparnis gegenüber Variante 1 = 15.6 MCHF	Energie LCC = 334 GWh (+ 10 GWh gegenüber Variante 1)	
		LCC Mehrkosten für Energie 1.3 MCHF gegenüber Variante 1	
Variante 4		Repeater-Anpassung und Fensterersatz mit «Edelgasfüllung» - 100% Fensterersatz	
	Pro (+)	Contra (-)	
	Neue Scheiben mit Ug-Wert 1.2	Hohe Instandhaltungskosten im Lifecycle	
	Komfortsteigerung bei Kunden durch 100% Ersatz der Scheiben	Hohe Kosten der Investition durch Repeater-Anpassung (MIMO 2x2)	
		Hohe Zusatzkosten durch Repeater Ersatz nach 10 Jahren (Obsoleszenz)	
	LCC Gesamtkosten = Keine Kosteneinsparung gegenüber Variante 1	Energie LCC = 317 GWh (- 7 GWh gegenüber Variante 1)	
		LCC Einsparung Energiekosten 0,9 MCHF gegenüber Variante 1	
Variante 5		Repeater-Anpassung und Fensterersatz mit «Edelgasfüllung» – ohne Tausch Notausstieg Fenster	
	Pro (+)	Contra (-)	
	Neue Scheiben mit Ug-Wert 1.2	Hohe Instandhaltungskosten im Lifecycle	
	LCC Gesamtkosten = Keine Kosteneinsparung gegenüber Variante 1	Hohe Kosten der Investition durch Repeater-Anpassung (MIMO 2x2)	
		Hohe Zusatzkosten durch Repeater Ersatz nach 10 Jahren (Obsoleszenz)	
		Energie LCC = 317 GWh (- 7 GWh gegenüber Variante 1)	
		LCC Einsparung Energiekosten 0,9 MCHF gegenüber Variante 1	

4.4.6. Empfehlung und Begründung

Die Variante 3 «Fensterersatz HF-Scheiben mit «Edelgasfüllung» - ohne Tausch Notausstieg Fenster» wird aus finanzieller Sicht empfohlen.

Über den Lifecycle (2017 – 2043) gerechnet ergab sich bei «Variante 3» zwar ein erhöhter Energiebedarf von 1.3 MCHF (+10 GWh), jedoch geringere Investitions- und Instandhaltungskosten von kumuliert ca. 15.6 MCHF.

Die Variante 3 ist zu bevorzugen, da es zusätzlich höhere Einsparungen durch den Verzicht der anstehenden Repeater-Anpassungen (MIMO 2x2) und dem Wegfall des Repeater-Ersatz nach 10 Jahren mit sich bringt. Mit einem sehr ähnlichen finanziellen Ergebnis kann ebenfalls die Variante 2 « Fensterersatz HF-Scheiben mit Edelgasfüllung – 100% Fensterersatz» in Betracht gezogen werden.

Ein mitentscheidender Faktor im Energieverbrauch, der g-Wert, lag bei den Varianten 2 und 3 bei 0.41 und somit leicht höher als bei den Scheiben der Erstausrüstung (0.39). Hier wurden Energieverluste und somit Mehrkosten für Energie ausgewiesen.

Gesamthaft fielen diese jedoch nicht so stark ins Gewicht, auch der Umstand, dass der Energieverbrauch der Repeater (700 W pro Repeater) wegfällt, lässt die LCC Gesamtbetrachtung trotzdem positiv erscheinen.

Im Modernisierungsprojekt IC2020 wurde ein kompletter Fensterersatz beschlossen und somit die Variante 2 gewählt. Die Umsetzung ist im Gange.

Gesamtfazit:

Nach der Durchführung von mehreren LCC Betrachtungen für verschiedene Flottentypen (IC2020, Domino, ICN, etc.) kann festgehalten werden:

- Mobilfunkdurchlässige Scheiben schneiden aus LCC Sicht im Vergleich zum Repeater deutlich besser ab:
 - Deutlich geringere Investitionskosten.
 - Reduzierte Instandhaltungskosten.
 - Je nach Fahrzeugtyp unterschiedlicher Nettoenergieverbrauch. IC 2020 mit leicht höherem und Domino mit tieferem Nettoenergieverbrauch (Energieverbrauch Repeater gegenüber leicht erhöhter Kühlleistung im Sommer).
- Mangels Langzeiterfahrungen können über das Alterungsverhalten der Scheiben derzeit nur Abschätzungen getroffen werden.
- Eine Absicherung der Langzeitr Risiken erfolgt durch Einforderung zusätzlicher Garantien im Rahmen der Beschaffung.

4.5. AKTUELLE MARKTSITUATION UND BAHNBETREIBER MIT HF-SCHEIBEN

Vor etwa zwei Jahren gab es am Markt nur wenige Glashersteller, die mit laserbehandelter Verglasung erste Versuche durchführten. Mittlerweile bieten fast alle grossen Scheibenlieferanten der Branche Lösungen für mobilfunkdurchlässige Verglasungen an und es besteht die Chance, dass die Kostenaufschläge für die Laserbehandlung der Scheiben sinken werden. Aktuell beträgt der Mehrpreis gegenüber einer normalen Scheibe je nach Scheibentyp 20 bis 50%.

Folgende (Scheiben-)Lieferanten bieten in 2019 HF-Scheiben an:

- AGC, Moutier, Schweiz (neu: AGC, Brüssel, Belgien)
- Flachglas Wernberg GmbH, Wernberg-Köblitz, Deutschland
- Schollglas Sachsen GmbH, Nossen, Deutschland
- SAINT-GOBAIN SULLY, Sully-sur-Loire, Frankreich
- Sessa Klein, Italien (Produktlösungen in Arbeit)
- Siemens Schweiz AG, Wallisellen, Schweiz (Patent)

Bahnbetreiber mit HF-Scheiben (nicht abschliessend):

Transportunternehmen (CH)	Hersteller/Fahrzeug	Scheibenlieferant
BLS AG	Bombardier «Nina»	AGC, Moutier
RBS	Stadler	Flachglas
SOB AG	Stadler «Traverso» & «Flirt»	Flachglas
AB	Stadler «Tango»	Flachglas
Transportunternehmen (A&D)	Hersteller/Fahrzeug	Scheibenlieferant
ÖBB	Bombardier «Talent»	Saint Gobain
Rhein-Ruhr-Express (RRX)	Siemens «Desiro»	Schollglas

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen HF-Scheiben und Repeatern bestätigen, dass die HF-Scheiben gleich gut oder besser als Repeater sind. Auch schneiden die HF-Scheiben bei den durchgeführten LCC Betrachtungen im Vergleich zu Repeatern deutlich besser ab. Obwohl die neuen Scheiben gegenüber den Konventionellen leicht höhere Energieverluste aufweisen und Mehrkosten verursachen, fällt die Gesamtbilanz positiv aus.

Pauschale Aussagen zur Energieeinsparung bei HF-Scheiben und zum Beitrag zur Energiestrategie können aufgrund der vorliegenden Ergebnisse zurzeit nicht gemacht werden. Die HF-Scheiben führen mit dem Wegfall des Energieverbrauchs der Repeater je nach Fahrzeugtyp zu einem tieferen (Domino-Flotte) oder leicht höheren (IC 2020-Flotte) Nettoenergieverbrauch.

Die SBB und das InTrainCom-Konsortium empfehlen, bei zukünftigen Fahrzeugbeschaffungs- und Modernisierungsprojekten HF-Scheiben statt Repeater einzusetzen. Eine Absicherung der Langzeitriskien (z.B. Alterungsverhalten der Scheiben) soll durch die Einforderung zusätzlicher Garantien im Rahmen der Beschaffung erfolgen.

Aktuelle SBB-Fahrzeugprojekte:

Fahrzeugprojekte mit HF-Scheiben in Umsetzung	IC2020, Domino, GTW Seetal
Fahrzeugprojekte mit HF-Scheiben in Prüfung	ICN, IC Bt, EW IV, EC und DTZ

Die HF-Scheiben unterstützen 5G in den heute eingesetzten Frequenzbändern (800 – 2600 MHz) sowie auch die neuen 700 MHz Frequenzen. Um die für die weitere Erhöhung der Bandbreite notwendigen neuen 3.5 GHz Frequenzen optimal in den Zug zu bringen, müssen weitere Abklärungen abgeschlossen werden.

Gemeinsam mit den Mobilfunkanbietern (Swisscom, Sunrise und Salt) werden für zukünftige Verglasungs-Ausschreibungen die funktionellen Anforderungen an eine mobilfunkdurchlässige Verglasung abgestimmt. Die aktuelle Spezifikation der Mobilfunkprovider ist im Anhang dieses Berichtes aufgeführt. Interessierte Transportunternehmen können sich bei Bedarf an das InTrainCom-Konsortium wenden.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Hier sind die im Bericht verwendeten Symbole und Abkürzungen (mit den dazugehörigen Einheiten oder Definitionen) zusammenzustellen.

HF-Scheiben	Hochfrequenz-Scheiben , mobilfunkdurchlässige Scheiben
InTrainCom	Ein Konsortium, bestehende aus Salt, Sunrise und Swisscom, welches das Ziel verfolgt den Mobilfunkempfang im Zug zu verbessern.
LCC	Life Cycle Cost – Lebenszykluskosten
SISO	Single Input, Single Output bezeichnet ein drahtloses Kommunikationssystem, bei dem sowohl der Sender als auch der Empfänger jeweils eine Antenne verwenden. SISO ist die einfachste Antennentechnologie.

MIMO (2x2)	Multiple Input, Multiple Output bezeichnet in mehreren Bereichen drahtloser Übertragung in der Nachrichtentechnik ein Verfahren bzw. ein Übertragungssystem für die Nutzung mehrerer Sende- und Empfangsantennen zur drahtlosen Kommunikation.
CS	Circuit Switched ermöglicht die Sprachtelefonie über GSM- und UMTS-Netze.
VoLTE	Voice over LTE ist eine Mobilfunktechnologie, welche es ermöglicht, über das 4G-Netz Sprachtelefonie zu nutzen

Anhänge

Anhang 1: Vergleich HF/SISO/MIMO IC2000

Anhang 2: P3 Messbericht IC2000

Anhang 3: Messungen Domino

Anhang 4: Messungen ICN

Anhang 5: Schlussmessung IC2020

Anhang 6: SBB Kundenbefragung

Anhang 7: LCC-Analyse IC2000

Anhang 8: LCC-Analyse Domino

Anhang 9: Spezifikation InTrainCom
