



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)

Bedarfsabhängige Aussenluftvolumenstrom- regulierung ICN

Schlussbericht

Johannes Dréwniok, Stephan Geiger

SBB Schweizerische Bundesbahnen AG

Personenverkehr Flottentechnik

Wylersstrasse 125 · 3000 Bern 65 · Schweiz

Johannes.drewniok@sbb.ch · www.sbb.ch

Begleitgruppe

BAV: Walter Josi, Tristan Chevroulet, Stefan Schnell, 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: 026
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 15.12.2017

Inhalt

Executive Summary (D).	3
Executive Summary (F)	4
Executive Summary (E).....	5
Zusammenfassung	6
1. Ausgangslage	6
2. Ziel der Arbeit	6
3. Projektansatz und aktueller Wissensstand	6
4. Ergebnisse und Diskussion	7
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	8
Résumé	9
6. Situation initiale	9
7. Finalité de ce travail.....	9
8. Approche du projet et état actuel des connaissances.....	9
9. Résultats et discussion.....	10
10. Déductions finales et recommandations	11
Anhang	12

Executive Summary (D)

Der ICN (InterCity Neigezug) wird mit einer besetzungsabhängigen Aussenluftvolumenstromsteuerung der Klimaanlage ausgerüstet. Der Anteil Aussenluft wird entsprechend dem realen Passagieraufkommen im Fahrzeug geregelt: Jeder Wagen wird mit zwei CO₂-Sensoren ausgestattet, ein Sensor je Klimagerät. Das CO₂-Äquivalent in der Raumlufte wird als Mass für die Personenbesetzung verwendet und als Regelgrösse der Leittechnik zugeführt. Mittels Softwareanpassung wird die CO₂-Regelung in der Fahrzeulleittechnik implementiert.

Durch Messungen am Fahrzeug wurden deutlich tiefere Aussenluftmengen nachgewiesen. Zudem ist das Innendruckniveau deutlich höher als in den Unterlagen der Fahrzeuginbetriebnahme dokumentiert. Trotz der mehrfach gemessenen tieferen Aussenluftmengen sind von dieser Fahrzeugflotte höchstens vereinzelt Klagen zur Luftqualität bekannt. In begleiteten Betriebsmessungen konnte gezeigt werden, dass auch bei geschlossenen Aussenluftklappen, maximaler Besetzung und Fahrzeiten bis zu 45 Minuten die CO₂-Pegel nur moderat steigen. Bei den Bahnhöfen kommt es durch den Personenwechsel zu einem deutlichen Absinken des CO₂-Pegels.

Im Rahmen des Projekts wurde ein ICN-Triebzug mit CO₂-Sensoren ausgerüstet, die für den Serienumbau nötigen Anleitungen erstellt und ein Probetrieb durchgeführt.

Die CO₂-Regelung zeigte während der Versuchszeiträumen eine hohe Regelgüte und die CO₂-Konzentration lag nur in kurzen Intervallen über der vorgegebenen Grenze von 1400 ppm. Der direkte Raumluftevergleich zwischen zwei Wagen mit und ohne CO₂-Regelung zeigt hinsichtlich der Raumlufte-temperatur untereinander sowie zum Sollwert keine grossen Unterschiede.

Durch die neu implementierte CO₂-Regelung werden die Aussenluftklappen der Klimageräte deutlich häufiger bewegt. Wie hoch die Restlebensdauer der Klappensteuerung ist und in wie weit diese durch die CO₂-Regelung verkürzt wird, lässt sich schwer abschätzen. Für eine erste Beurteilung wird eine Befundung eines Antriebs für das Jahr 2018 angesetzt.

Dieses Projekt wurde im Rahmen der Energiestrategie 2050 des öffentlichen Verkehrs vom Bundesamt für Verkehr mit 435'000 CHF unterstützt. Der Bearbeitungszeitraum ist von November 2014 bis November 2017.

Executive Summary (F)

Le train interCity pendulaire ICN sera équipé d'une climatisation dont le débit du volume d'air extérieur sera commandé proportionnellement au taux d'occupation des véhicules. De la sorte, la part d'air extérieur est régulée dans le véhicule en fonction du nombre de passagers. Chaque voiture comprendra deux capteurs de CO₂, soit un par climatiseur. L'équivalent CO₂ contenu dans l'air des compartiments déterminera le nombre de passagers et servira de variable de réglage à transmettre à la technique de commande. Un logiciel spécifique implémentera dans la technique de commande du véhicule le réglage basé sur la concentration en CO₂.

Des mesures réalisées sur le véhicule ont permis de mettre en évidence une réduction importante du volume d'air extérieur capturé. Le niveau de pression intérieur mesuré est aussi nettement plus élevé que celui figurant dans les documents de mise en service du véhicule. Malgré le volume d'air extérieur nettement inférieur mesuré à plusieurs reprises, le nombre de plaintes concernant la qualité de l'air sur la flotte des ICN est faible. Les mesures faites en cours d'exploitation commerciale ont montré que, pour une occupation maximale, des clapets d'aspiration de l'air extérieur fermés et une durée de parcours de 45 minutes, la concentration en CO₂ ne s'est élevée que modérément. La concentration en CO₂ redescend ensuite rapidement avec les échanges de voyageurs durant les arrêts en gare.

Dans le cadre du projet, un essai en exploitation a été effectué sur une rame ICN équipée de capteurs de CO₂ en vue d'établir les directives utiles aux transformations en série.

Au cours de la phase de tests, il est ressorti que la régulation du CO₂ s'effectuait de manière très précise et que les concentrations de CO₂ ne dépassaient qu'à de brèves intervalles le seuil de 1400 ppm imposé. Concernant la température de l'air ambiant, les mesures comparatives effectuées entre deux voitures, une avec et l'autre sans régulation basée sur la concentration en CO₂, ne montrent pas de différences significatives.

Le nouveau réglage basé sur la concentration en CO₂ intensifie le fonctionnement des clapets d'aspiration de l'air extérieur. Il est actuellement difficile de déterminer la durée de vie restante de la commande des clapets d'aspiration et dans quelle mesure celle-ci pourrait diminuer avec le réglage basé sur la concentration en CO₂. Une première estimation pourra être fournie en diagnostiquant leur système d'entraînement durant l'année 2018.

Ce projet est soutenu à hauteur de CHF 435 000 par l'Office fédéral des transports dans le cadre de la stratégie énergétique 2050 des transports publics. La durée de l'étude s'étend de novembre 2014 à novembre 2017.

Executive Summary (E)

The ICN (InterCity tilting train) is equipped with an occupancy-dependent airflow regulation of the air conditioning system. The proportion of fresh air flow is regulated according to the actual occupation degree of the vehicle: Each coach is equipped with two CO₂ sensors, one sensor per air conditioning system. The CO₂ equivalent in the passenger compartment is used as a measure for the occupation degree and used as a feedback variable for the regulation of the air conditioning system. By means of software adaptation, the CO₂ regulation is implemented in the train control system.

Measurements on the vehicle showed significantly lower volumes of fresh air intake. In addition, the internal pressure level is significantly higher than documented in the vehicle commissioning documentation. Despite the low quantities of fresh air which was measured for several times, complaints about low air quality of this fleet are rare. Accompanying measurements during commercial operating have shown that even with the outside air flaps closed, maximum occupancy and travel times of up to 45 minutes, the CO₂ level only increase moderately. At stations, change of passengers lead to a significant drop of CO₂ level.

As part of the project, an ICN train set was equipped with CO₂ sensors. Instructions needed for the refurbishment of trains were created and a test run was carried out.

The CO₂ regulation showed a high control quality during the test period and the CO₂ concentration only exceeded the specified limit of 1400 ppm for short intervals. The quality of control of the compartment temperature was compared between two coaches with and without CO₂ regulation. The newly implemented regulation did not show any major differences with regard to the compartment air temperature or to the set value.

Due to the newly implemented CO₂ regulation, the outside air flaps of the air conditioners are moved much more frequently. How long the remaining lifespan of the flap drive is and how far it is shortened by the CO₂ control, is difficult to estimate. For a first assessment of possibly increased wear, a diagnosis of a flap drive is proposed for 2018.

This project was supported by the Federal Office of Transport with CHF 435,000 as part of the Energy Strategy 2050 of public transport. The processing period is from November 2014 to November 2017.

Zusammenfassung

1. Ausgangslage

Für den thermischen Komfort der Passagiere (Heizung, Lüftung, Klimatisierung HLK) werden auf dem ICN etwa 15% der gesamten für den Fahrbetrieb eingesetzten Energie verwendet. Einer der mitbestimmenden Faktoren des Energieaufwandes der Klimaanlage ist der in das Fahrzeug einzubringende Aussenluftvolumenstrom zur Erreichung der notwendigen Lufthygiene-Grenzwerte für den Personenaufenthalt. Bisher werden beim ICN die Aussenluftvolumenströme, so wie es die Norm für Fernverkehrsfahrzeuge (EN13129) vorgibt, über die Aussenlufttemperatur gesteuert. Eine Regelung des Aussenluftvolumenstromes über die Anzahl der Fahrgäste erfolgte bisher nicht. Die Aussenluftklappen wurden bisher so gesteuert, als ob permanent eine Vollbesetzung in den Einzelwagen vorliegen würde. Das heisst, es wurden je Wagentyp und Sitzplatzanzahlen ca. 1'000-1'800 m³/h Aussenluft in die Fahrgasträume gefördert. Nach internen Statistiken liegt der durchschnittliche Auslastungsgrad im Fernverkehr im Tagesdurchschnitt allerdings nur bei 30% bis 35% Sitzplatzbelegung.

Aus der aufgezeigten Belegungsdifferenz im Tagesgang, den hygienisch erforderlichen spezifischen Aussenluftfraten pro Person sowie der derzeit gestalteten Aussenluftvolumenstromregelung liegen mögliche Potentiale für Energieeinsparungen bei der HLK-Anlage des ICN. Die Regelung des erforderlichen Aussenluftvolumenstromes erfolgt im ICN über den Soll-Istwert Vergleich des CO₂-Gehalts der Raumluft.

Die SBB verfügt über 44 Fahrzeuge des Typs ICN (InterCity-Neigezug RABDe 500) zu je 7 Einzelwagen, die in Einzel- oder Mehrfachtraktion innerhalb der Schweiz im Fernverkehr verkehren. Pro Einzelwagen sind zwei Kompaktklimageräte im Dachbereich über den Einstiegsplattformen installiert, welche die Klimatisierung des Fahrgastraums sicherstellen. Die Fahrzeuge wurden von 1999 bis 2005 durch Adtranz Zürich Oerlikon und Pratteln, FIAT-SIG Neuhausen (1. Serie), bzw. Bombardier Transportation Zürich Oerlikon und Pratteln, Alstom Neuhausen (2. Serie), gefertigt.

2. Ziel der Arbeit

Mit der Reduktion des Aussenluftvolumenstromes wird automatisch der Umluftanteil erhöht und damit die Mischluftenthalpie als Ausgangszustand für den Heiz- und Kühlprozess positiv beeinflusst. Dadurch reduziert sich der Energieaufwand für die Klimatisierung des Fahrgastraums.

Im Rahmen dieses Projektes wurden ein funktionsfähiger Prototypenzug entwickelt (Software- und Hardwareanpassungen), die Rückwirkungsfreiheit auf die Regelgüte der Raumlufttemperatur überprüft und eine Abschätzung der Energieeinsparung erstellt.

3. Projektansatz und aktueller Wissensstand

Mit der besetzungsabhängigen Aussenluftvolumenstromregelung wird der Anteil Aussenluft entsprechend dem realen Passagieraufkommen im Fahrzeug geregelt: Jeder Wagen wird mit zwei CO₂-Sensoren ausgestattet, ein Sensor pro Wagenkastenhälfte. Das CO₂-Äquivalent in der Raumluft wird als Mass für die Personenbesetzung verwendet und als Regelgrösse der Leittechnik zugeführt.

Zur Erfassung des Besetzungsgrades wird kontinuierlich der Ist-Wert des CO₂-Gehalts der Raumluft mittels CO₂-Sensoren erfasst. Die Regelung verwendet von beiden Sensoren eines Wagens den jeweils grösseren Wert als Ist-Grösse. Zum Aufbau einer qualitativ hygienisch vertretbaren Regulierung wird auf einen Sollwertwert des CO₂-Pegels von 1400 ppm geregelt.

Das CO₂-Messsignal wird innerhalb der zu modifizierenden Klimaanlage-Regelung für die Aussenluftvolumenstromregelung verwendet, d.h. die Ansteuerung der Aussenluftklappen geschieht in Abhängigkeit von der realen Besetzung des Fahrzeugs.

Dazu muss pro Klimagerät ein CO₂-Sensor installiert und mit der Leittechnik des Wagenrechners verbunden werden.

Zusätzlich braucht es das Engineering des mechanischen und elektrischen Einbaus der Sensoren und zur Behandlung der Schnittstellen sowie eine Softwaremodifikation der Klimaanlage-Regelung.

4. Ergebnisse und Diskussion

Bei Vorversuchen im Juli und Oktober 2015 konnten zwar die in alten Unterlagen von 1999 gemessenen Zuluftmengen annähernd bestätigt werden, bei der maximalen Fortluftmenge gab es aber deutliche Abweichungen. Über die Fortluftöffnung (Ventilator beim WC) strömt nur die Fortluftmenge in der Grössenordnung der Aussenluftmenge eines Klimagerätes ab, obwohl jeder Wagen zwei Klimageräte hat. Bei maximal geöffneten Aussenluftklappen ist im Fahrzeug ein relativ hoher Überdruck (um 60 Pa) zu messen. Die restliche Abluft strömt über die Personenübergänge in die benachbarten Wagen ab.

Der hohe Differenzdruck des Fahrgastraums gegenüber Aussen beeinflusst die Druckverhältnisse in den Mischkammern der Klimageräte und reduziert die maximal zu erreichende Aussenluftmenge. Siehe Abbildung 1 bis Abbildung 3.

Bei begleiteten Messfahrten im September 2015 wurden die Aussenluftklappen zunächst nicht aktiv forciert. Die Besetzung wirkt sich auf den CO₂-Pegel aus, bleibt aber unter 900 ppm. Bei den Haltestellen kommt es zu einem messbaren Luftaustausch und zu einem Absinken des CO₂-Pegels im Fahrgastraum.

Anschliessend wurden die Aussenluftklappen forciert geschlossen. Während einer längeren Fahrt ohne Halt (44 Minuten) bei voller Besetzung des Steuerwagens und geschlossener Aussenluftklappe kommt es zu dem höchsten gemessenen Anstieg des CO₂-Pegels von 1600 ppm. Ansonsten lagen die Pegel fast immer (trotz geschlossener Aussenluftklappe bei mittlerer Besetzung) im Bereich von 900-1200 ppm. Erwähnenswert ist, dass es bei der Einfahrt in den Grenchenbergtunnel innerhalb von 30 Sekunden zu einem Abfall des CO₂-Pegels von 1200 ppm auf 700 ppm kommt. Offenbar kommt es durch die Einfahrt in das Bauwerk zu einem starkem Luftaustausch.

Der Versuchszug ICN 500 000 war mit Software und Hardware ab Ende Januar 2017 bereit und ging ab Februar 2017 in den Probetrieb. Die CO₂-Regelung zeigte während der Versuchszeiträumen eine hohe Regelgüte und die CO₂-Konzentrationen lag nur in kurzen Intervallen über der vorgegebenen Grenze von 1400 ppm lagen, siehe Abbildung 4. Eine Optimierung der Regelparameter wurde im März 2017 vorgenommen und kann zukünftig auch mittels Diagnoseschnittstelle realisiert werden ohne eine Änderung an der Software vornehmen zu müssen.

Eine Überprüfung der im Fahrzeug verbauten CO₂-Sensoren zeigte eine gute Kongruenz der Messwerte mit kalibrierten mobilen Messgeräten, die zu Vergleichszwecken während begleiteter Versuchsfahrten eingesetzt wurden.

Der direkte Raumlufftemperaturvergleich zwischen zwei Wagen mit und ohne CO₂-Regelung zeigt hinsichtlich der Raumlufftemperatur untereinander sowie zum Sollwert keine grossen Unterschiede. Die Abweichungen vom Sollwert liegen im Mittel unterhalb von 1 K, maximal wurden 2.1 K gemessen. Somit scheint der Einfluss der CO₂-Regelung auf die Qualität der Raumlufftemperatur vernachlässigbar zu sein. Jedoch wurde festgestellt, dass die Referenzdaten auf dem Wagen 200 eine deutliche Abweichung zu den vom Fahrzeug gemessenen Temperaturen aufweisen.

Durch die neu implementierte CO₂-Regelung werden die Aussenluftklappen der Klimageräte deutlich häufiger bewegt. Bisher wurden diese wenige Male pro Tag bewegt, nun werden sie 40 Mal und häufiger angesteuert. Eine Auswertung des Materialverbrauchs hat ergeben, dass bei den meisten Klimageräten auf dem ICN noch die ursprüngliche Klappensteuerung verbaut ist. Wie hoch die Restlebensdauer der Klappensteuerung ist und in wie weit diese durch die CO₂-Regelung verkürzt wird, lässt sich schwer abschätzen. Für eine erste Beurteilung wird eine Befundung eines Antriebs für das Jahr 2018 angesetzt.

Für eine erste Aussage zur Energiesparwirkung wurde der Energieverbrauch der Hilfsbetriebe (beinhaltet sämtliche Energieverbraucher ausser Traktionsenergie) für den Zeitraum März bis Oktober 2017 pro gefahrenen Kilometer pro Fahrzeug ausgewertet. Diese Werte wurden für sämtliche 44 Fahrzeuge der ICN-Flotte anhand von Leittechnikdaten erhoben und ein Vergleich zwischen dem Prototypenfahrzeug und der übrigen Flotte erstellt. Abbildung 5: Vergleich der kumulierten Energieverbräuche vom 13.3.2017 bis 20.3.2017 von zwei ICN 2.-Klasse-Wagen: Wagen B7 mit aktiver CO₂-Regelung, Wagen B3 mit deaktivier CO₂ Regelung. Berechnung der Energie aus Produkt der Einschaltzeit mal Leistung der Heizungen. Es ergibt sich eine relative Einsparung von etwa 400 kWh zwischen den beiden Wagen für diese Woche.

Hochgerechnet auf die Fahrzeugflotte verbrauchte das Prototypenfahrzeug in diesem Zeitraum ca. 1.0 GWh weniger Energie pro Jahr. Da im Messzeitraum jedoch die Wintermonate fehlen, ist noch mit

einer deutlichen Steigerung zu rechnen. Aufgrund von Annahmen wird davon ausgegangen, dass eine Einsparung von 3.5 GWh pro Jahr für die 44 ICN Fahrzeuge möglich sein sollte.

Nach den positiven Erfahrungen mit dem Prototypenfahrzeug wurde die Änderung für die gesamte ICN-Flotte der SBB freigegeben. Sie wird bis 2020 im Rahmen von Revisionen auf die Fahrzeuge ausgerollt.

Dieses Projekt wurde im Rahmen der Energiestrategie 2050 des öffentlichen Verkehrs vom Bundesamt für Verkehr mit 435'000 CHF unterstützt. Der Bearbeitungszeitraum ist von November 2014 bis November 2017.

Abbildung 6 zeigt Energieminderkosten und Kosten der Energiesparmassnahme pro Jahr ohne Diskontierung, dargestellt in CHF. Die Break-Even-Analyse ergibt, dass die Investitionskosten nach 10 Jahren (mit Beiträgen BAV) bzw. nach 11 Jahren (ohne Beiträge BAV) durch die Energieminderkosten ausgeglichen werden.

Gesamthaft werden mit der Umrüstung der ICN-Flotte 2.0 Mio. CHF investiert. 1.1 Mio. CHF für Engineering einschliesslich Anpassung der Fahrzeuggestechnik, 0.9 Mio. CHF für die Installation der nötigen Hardware auf den 44 Zügen. Dem gegenüber stehen Energieminderkosten von jährlich 340'000 CHF, wenn der Umbau der ICN-Flotte abgeschlossen ist. In der Break-Even Analyse sind leicht steigende Energiekosten berücksichtigt, die Steigerungen beruhen auf Annahmen von SBB Energie.

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Mit der Reduktion des Aussenluftvolumenstromes wird automatisch der Umluftanteil erhöht und damit die Mischluftenthalpie als Ausgangszustand für den Heiz- und Kühlprozess positiv beeinflusst. Dadurch reduziert sich der Energieaufwand für die Klimatisierung nachweislich.

Anhand des im Rahmen dieses Projektes erstellten Prototyps konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist, eine CO₂-Regelung auf einem fast zwanzigjährigen Fahrzeug zu implementieren, ohne die Regelgüte der Raumlufttemperatur negativ zu beeinflussen. Als Regelgrösse hat sich die Messung der CO₂-Konzentration im Fahrgastraum bewährt. Die Massnahme wurde für den Flottenrollout der ICN-Flotte freigegeben.

Weiter konnten wertvolle Erfahrungen für die zukünftige Umrüstung weiterer Fahrzeugflotten mit diesem Projekt gesammelt werden. Namentlich die Fahrzeuge der IC2000-Flotte werden von der SBB für eine mögliche Umrüstung auf bedarfsgerechte Aussenluftvolumenstromregelung überprüft. Die Erfahrungen mit diesem Projekt zeigen aber auch, dass jeder Fahrzeugtyp individuell geprüft und die Umsetzung eng begleitet werden muss. Es gilt das Risiko auszuschliessen, die Fahrgastraumklimatisierung durch diesen tiefgreifenden Eingriff negativ zu beeinflussen. Für Fahrzeugneubeschaffungen gehört diese Massnahme schon heute zu den relativ einfach umzusetzenden Energiesparmassnahmen, insbesondere wenn es sich um Neuentwicklungen von Fahrzeugen handelt.

Résumé

6. Situation initiale

Sur les ICN, environ 15% de l'énergie consommée durant la marche est utilisée pour assurer le confort des voyageurs (chauffage, ventilation, climatisation CVC). Le volume d'air extérieur absorbé par le véhicule pour maintenir une bonne qualité de l'air nécessaire aux passagers du train explique en partie la consommation d'énergie des climatisations. Jusqu'ici, pour répondre à la norme EN 13129 «Conditionnement de l'air pour matériel roulant grandes lignes», les volumes d'air extérieur absorbés sur l'ICN étaient commandés en fonction de la température de l'air extérieur. Une régulation du débit du volume d'air extérieur commandée proportionnellement au nombre de passagers n'avait jamais été réalisée auparavant. La commande des clapets d'aspiration de l'air extérieur travaillait alors en permanence, comme si le taux d'occupation de chaque voiture était de cent pour cent. Ce qui signifie qu'en fonction du type de véhicule et du nombre de places assises offertes, le volume d'air extérieur pulsé dans les compartiments voyageurs s'élevait à environ 1000-1800 m³ par heure. D'après les statistiques internes, le taux d'occupation quotidien des places assises en trafic grandes lignes se situe en moyenne autour de 30 à 35%.

Sur la base connue de la variation du taux d'occupation en cours de journée, du débit d'air frais hygiéniquement requis par personne et du réglage établi actuellement pour contrôler le débit du volume d'air extérieur, il ressort un vrai potentiel d'économie sur l'énergie consommée par les installations CVC de l'ICN. Sur l'ICN, le débit de volume d'air extérieur nécessaire est réglé en fonction de la comparaison des valeurs réelle et nominale de la concentration en CO₂ de l'air ambiant.

Les CFF possèdent plus de 44 rames de type ICN (InterCity pendulaire RABDe 500) à 7 voitures chacune circulant en unité simple ou double sur le réseau grandes lignes suisse. Pour assurer la climatisation des compartiments voyageurs, chaque voiture est équipée de deux climatiseurs compacts montés dans la toiture, au-dessus des plates-formes d'accès. Ces rames ont été construites de 1999 à 2005 par Adtranz Zurich-Oerlikon et Pratteln, FIAT-SIG Neuhausen (1^{re} série), Bombardier Transportation Zurich-Oerlikon et Pratteln, Alstom Neuhausen (2^e série).

7. Finalité de ce travail

Par la diminution du flux d'air extérieur, la part d'air recyclé se trouve automatiquement augmentée, ce qui, par enthalpie du mélange d'air, influence positivement le processus de chauffage et de refroidissement. Il en résulte une réduction de l'énergie nécessaire à la climatisation des compartiments voyageurs.

Le cadre de ce projet comprend le développement d'un prototype de rame fonctionnel incluant les adaptations matérielles et logicielles nécessaires, le contrôle de l'absence de rétroaction en matière de qualité et de température normale de l'air et l'établissement d'une estimation de l'économie d'énergie réalisée.

8. Approche du projet et état actuel des connaissances

Le réglage du volume d'air extérieur consommé permet de moduler la part d'air frais dans le véhicule en fonction du nombre effectif de passagers. Chaque voiture comprendra deux capteurs de CO₂, soit un par demi-voiture. L'équivalent CO₂ contenu dans l'air des compartiments déterminera le nombre de passagers et servira de variable de réglage à transmettre à la technique de commande.

Pour déterminer le taux d'occupation, la concentration en CO₂ de l'air ambiant est mesurée en continu par des capteurs de CO₂. Le système de régulation utilise comme base de calcul la valeur la plus élevée fournie par les deux capteurs. Pour obtenir une qualité de l'air acceptable, le niveau seuil de CO₂ est fixé à 1400 ppm.

Le signal de mesure du CO₂ est utilisé directement dans le réglage de la climatisation à modifier pour ajuster le débit du volume d'air extérieur, ce qui revient à dire que la commande des clapets d'aspiration de l'air extérieur dépend du taux d'occupation effectif de chaque voiture.

Un capteur de CO₂ par climatiseur est installé à cet effet et relié à la technique de commande du calculateur du véhicule.

Le processus implique en outre l'ingénierie liée au montage mécanique et électrique des capteurs, au traitement des interfaces et à l'adaptation du logiciel de réglage de la climatisation.

9. Résultats et discussion

Les essais préliminaires réalisés en juillet et en octobre 2015 ont permis de confirmer les valeurs d'amenée d'air frais extraites des archives de 1999, sauf pour les quantités maximales qui s'en écartent considérablement. L'air s'échappant par les ouvertures de l'air vicié (par le ventilateur dans les WC) correspond en gros au volume d'air extérieur d'un climatiseur, malgré le fait que chaque véhicule en possède deux. Lorsque les clapets d'aspiration de l'air extérieur sont ouverts au maximum, on mesure une surpression relativement élevée dans le véhicule (aux alentours de 60 Pa). Le surplus de l'air évacué s'écoule vers les véhicules voisins par les intercirculations.

La haute différence de pression régnant dans le compartiment voyageurs par rapport à l'extérieur influence les rapports de pression dans les chambres de mélange du climatiseur, ce qui réduit le volume d'air extérieur maximal à atteindre. Voir Abbildung 1 à Abbildung 3.

Durant les courses de mesures accompagnées de septembre 2015, il n'y a pas eu d'activation forcée des clapets d'aspiration de l'air extérieur. Le taux d'occupation influence la concentration en CO₂, qui reste toutefois inférieure à 900 ppm. Durant les arrêts en gare, l'échange de l'air est mesurable et entraîne une baisse de concentration du CO₂ dans le compartiment voyageurs.

Ensuite, les clapets d'aspiration de l'air extérieur ont été forcés à la fermeture. Durant un long trajet sans arrêt (44 minutes) et une occupation totale de la voiture de commande avec les clapets d'aspiration de l'air extérieur fermés, les mesures de la concentration en CO₂ ont indiqué la hausse la plus élevée de 1600 ppm. Dans les autres cas, le niveau moyen pour une occupation moyenne et les clapets d'aspiration de l'air extérieur fermés s'élevait aux alentours de 900 à 1200 ppm. Il est intéressant de noter qu'au franchissement du tunnel de Grenchenberg, la concentration en CO₂ a chuté de 1200 ppm à 700 ppm en 30 secondes. L'entrée dans l'ouvrage d'art a manifestement intensifié l'échange de l'air dans le train.

Le train d'essai ICN 500 000 a été équipé en matériel et logiciel fin janvier 2017, ce qui a permis de débiter l'essai en exploitation à partir du mois de février 2017. Au cours de la phase de tests, il est ressorti que la régulation du CO₂ s'effectuait de manière très précise et que les concentrations de CO₂ ne dépassaient qu'à de brèves intervalles le seuil de 1400 ppm imposé, voir Abbildung 4. Une optimisation des paramètres de régulation entreprise en mars 2017 a autorisé dans le même temps leur modification directement à partir de la console de diagnostics, sans obliger à modifier le logiciel de base.

Un contrôle des capteurs de CO₂ montés dans le véhicule a montré une bonne conformité de valeurs avec celles mesurées au moyen des appareils portables utilisés durant l'accompagnement des courses d'essai.

Concernant la température de l'air ambiant, les mesures comparatives effectuées entre deux voitures, une avec et l'autre sans régulation basée sur la concentration en CO₂, ne montrent pas de différences significatives. Les écarts par rapport à la valeur nominale restent en moyenne inférieurs à 1 K, la valeur maximale mesurée étant de 2,1 K. On peut en déduire qu'une régulation basée sur le niveau de CO₂ n'affecte pas significativement la qualité de température de l'air ambiant. Force a été de constater que les données de référence de la voiture 200 s'écartaient notablement des températures lues sur le véhicule utilisé pour les mesures.

Le nouveau réglage basé sur la concentration en CO₂ intensifie le fonctionnement des clapets d'aspiration de l'air extérieur. Avant les essais, ceux-ci ne fonctionnaient que rarement en cours de journée. Ils fonctionnent maintenant au moins 40 fois, voire plus. Le dépouillement des données de consommation de pièces détachées a montré que sur la plupart des climatiseurs de l'ICN, la commande des clapets d'aspiration était d'origine. Il est actuellement difficile de déterminer la durée de vie restante de la commande des clapets d'aspiration et dans quelle mesure celle-ci pourrait diminuer avec le réglage basé sur la concentration en CO₂. Une première estimation pourra être fournie en diagnostiquant leur système d'entraînement durant l'année 2018.

Une première estimation de l'énergie économisée par kilomètre parcouru et par véhicule a pu être établie en mesurant la consommation d'énergie des services auxiliaires (qui englobe la totalité des consommateurs, sauf l'énergie de traction) entre mars et octobre 2017. Pour établir une comparaison entre le véhicule servant de prototype et le reste de la flotte, les données ont été tirées des valeurs fournies par l'électronique de commande des 44 véhicules de la flotte des ICN. Abbildung 5: Comparaison de la consommation d'énergie cumulée de deux voitures ICN de 2e classe, du 13 au 20.3.2017: voiture B7 avec régulation par CO₂ activée; voiture B3 avec régulation par CO₂ désactivée. Les courbes de la consommation d'énergie représentent le produit du temps de fonctionnement par la

puissance des chauffages. On constate une économie relative d'environ 400 kWh durant cette semaine entre les deux voitures.

D'après un calcul estimatif effectué durant cette période pour l'ensemble de la flotte, le prototype permettrait d'économiser environ 1 GWh d'énergie par année. Comme la période des mesures ne comprend pas les mois d'hiver, on peut même s'attendre à une nette augmentation de l'économie réalisée. En se basant sur ces hypothèses, on peut envisager une économie d'énergie de 3,5 GWh par année pour les 44 rames de la flotte des ICN.

Suite aux expériences positives réalisées sur le prototype, le feu vert a été donné pour transformer l'ensemble de la flotte ICN des CFF. Les travaux se dérouleront jusqu'en 2020, à l'occasion des révisions effectuées sur les véhicules.

Ce projet est soutenu à hauteur de CHF 435 000 par l'Office fédéral des transports dans le cadre de la stratégie énergétique 2050 des transports publics. La durée de l'étude s'étend de novembre 2014 à novembre 2017.

Abbildung 6 Graphique pluriannuel de la réduction des coûts d'énergie et des montants imputables aux mesures prises pour l'économie d'énergie, en CHF. L'analyse de rentabilité montre l'amortissement des coûts d'investissement grâce à la réduction des coûts d'énergie après 10 (avec le soutien de l'OFT) ou 11 ans (sans le soutien de l'OFT).

Au total, environ 2 millions de francs suisses seront investis dans la transformation de la flotte ICN: CHF 1,1 million pour l'ingénierie et l'adaptation de la technique de commande et CHF 0,9 million pour l'installation du matériel nécessaire sur les 44 rames. En regard à cela, une économie annuelle de CHF 340 000 pourrait être réalisée dès l'achèvement des travaux de transformation de la flotte ICN. L'analyse de rentabilité inclut une légère augmentation des coûts de l'énergie basés sur les prévisions réalisées par Énergie.

10. Déductions finales et recommandations

Par la diminution du flux d'air extérieur, la part d'air recyclé se trouve automatiquement augmentée, ce qui, par enthalpie du mélange d'air, influence positivement le processus de chauffage et de refroidissement. Cela a pour résultat de réduire le besoin en énergie de la climatisation des compartiments voyageurs.

Le prototype créé dans le cadre de ce projet a également permis de montrer qu'il est possible d'implémenter une régulation de la climatisation basée sur le niveau de CO₂ sur des véhicules vieux de vingt ans sans influencer négativement la température de l'air ambiant. La valeur de réglage basée sur la concentration de CO₂ dans les compartiments voyageurs a donc fait ses preuves. La mesure a donné le feu vert pour la transformation de la flotte ICN.

Les enseignements tirés de ce projet serviront également à transformer d'autres flottes de véhicules. Il s'agit en particulier de celle des IC 2000, sur laquelle les CFF envisagent également de faire régler le débit du volume d'air extérieur proportionnellement au taux d'occupation des véhicules. Les expériences réalisées durant ce projet ont aussi montré que chaque type de véhicule doit être examiné individuellement et que la transformation doit être suivie de près. Tout doit être mis en œuvre pour éviter que des interventions trop invasives n'aient un effet négatif sur le fonctionnement de la climatisation des compartiments voyageurs. Pour l'acquisition de nouveaux véhicules, cette mesure fait aujourd'hui partie intégrante des dispositions liées aux économies d'énergie relativement faciles à mettre en œuvre, en particulier lorsqu'il s'agit du développement de nouveaux véhicules.

Anhang

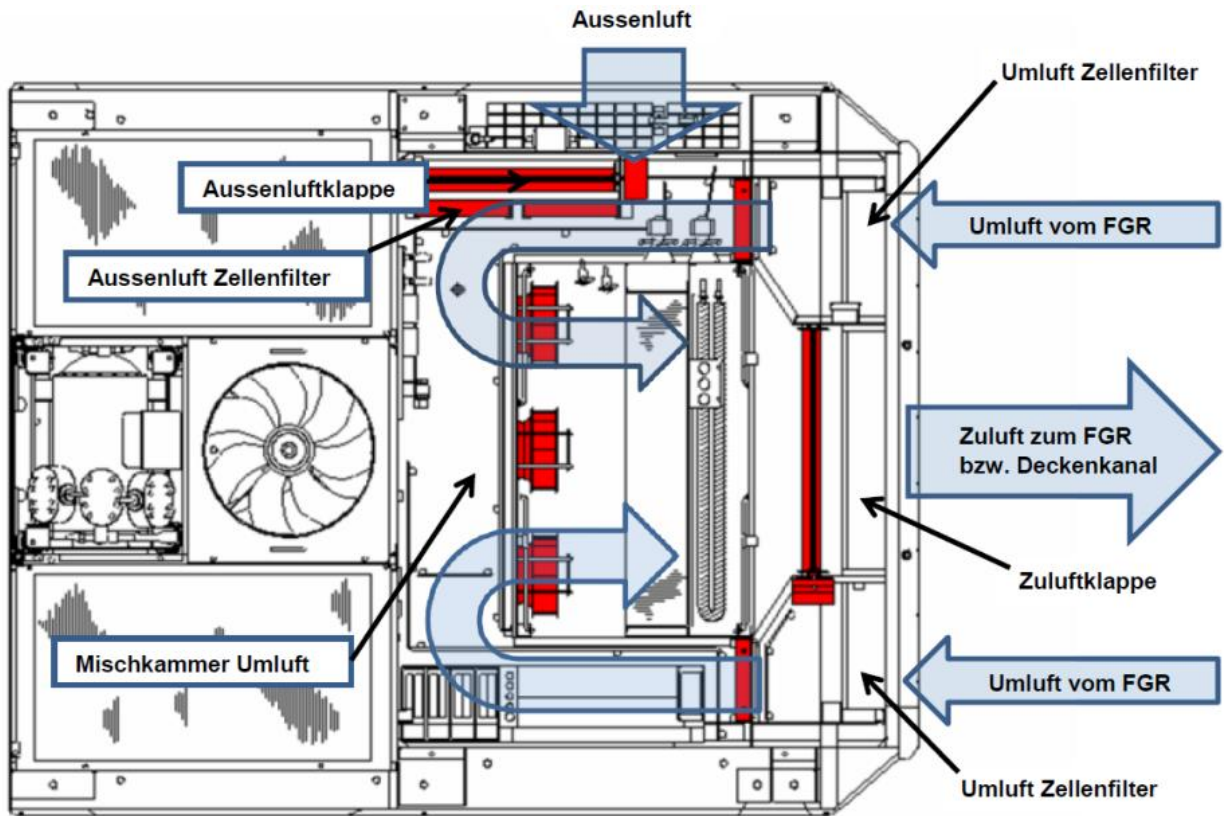


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Kompaktklimagerätes des ICN.

Structure schématisée d'un climatiseur compact de l'ICN.

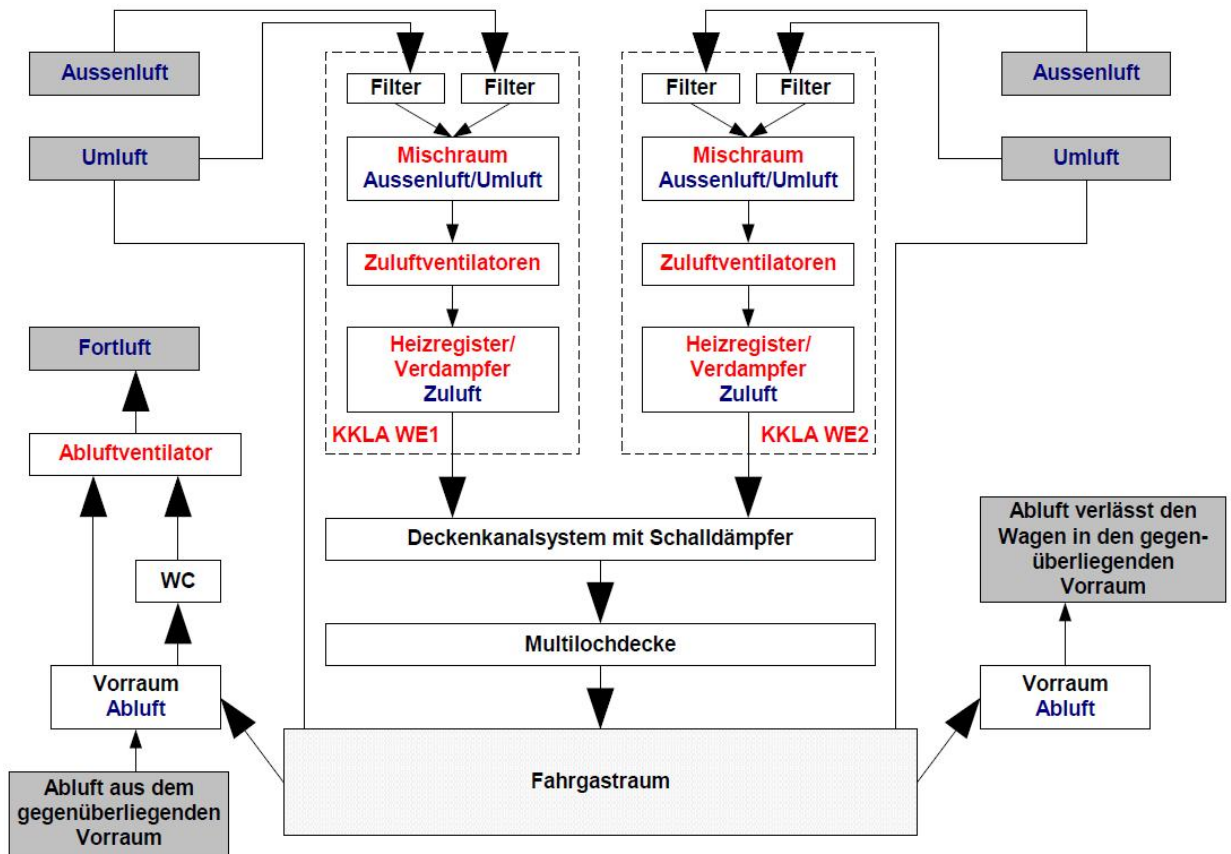


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Luftführung in einem ICN-Wagen.

Représentation schématique des circuits de ventilation installés dans une voiture ICN.

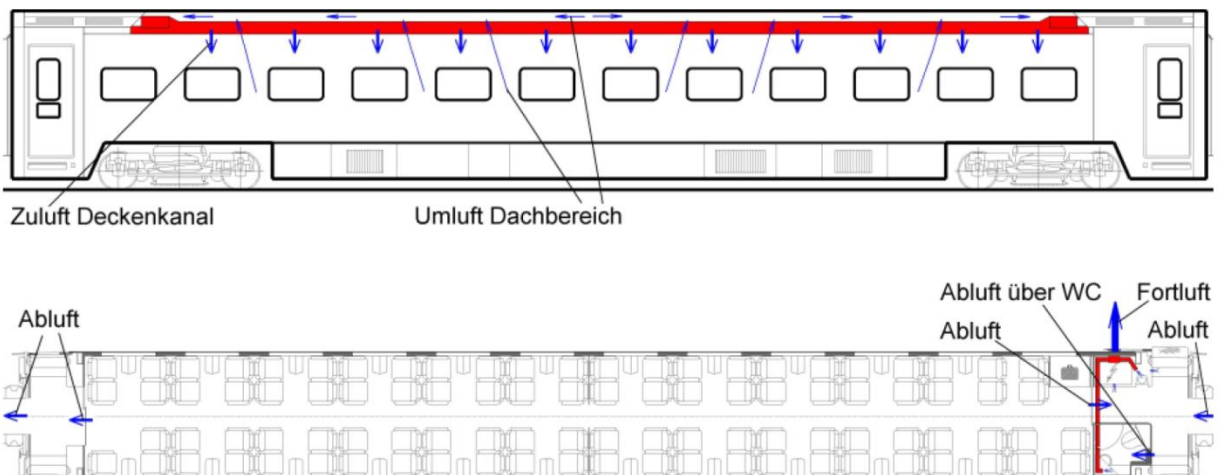


Abbildung 3: Darstellung der Luftführung innerhalb des Fahrzeugs (2.-Klasse-Wagen ICN).

Représentation de la circulation de l'air dans le véhicule (voiture de 2e classe de l'ICN).

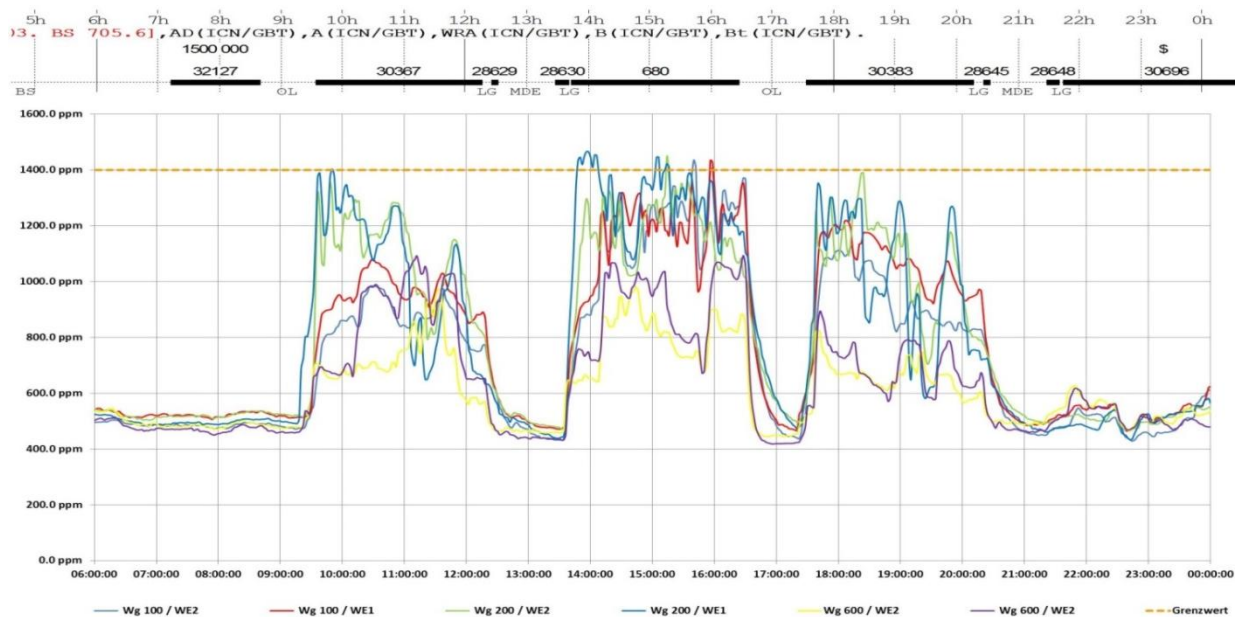


Abbildung 4: CO₂-Werte der vom Fahrzeug aufgezeichneten Regelung inkl. gefahrener Strecke vom 26.02.2017 auf der Nord-Süd-Achse (Olten–Lugano). Auf Wagen 600 (deaktivierte Regelung) sind erwartungsgemäss deutlich tiefere CO₂-Pegel festzustellen. Der Sollwert von 1400 ppm wird nur kurz überschritten, die Regelparameter wurden noch verbessert.

Graphiques des valeurs CO₂ et du parcours emprunté par le train le 26.2.2017 sur l'axe Nord-Sud (Olten–Lugano). Sur la voiture 600 (régulation désactivée), on remarque comme prévu un niveau de CO₂ nettement inférieur. La valeur nominale de 1400 ppm n'est dépassée que brièvement; les paramètres ont été encore améliorés.

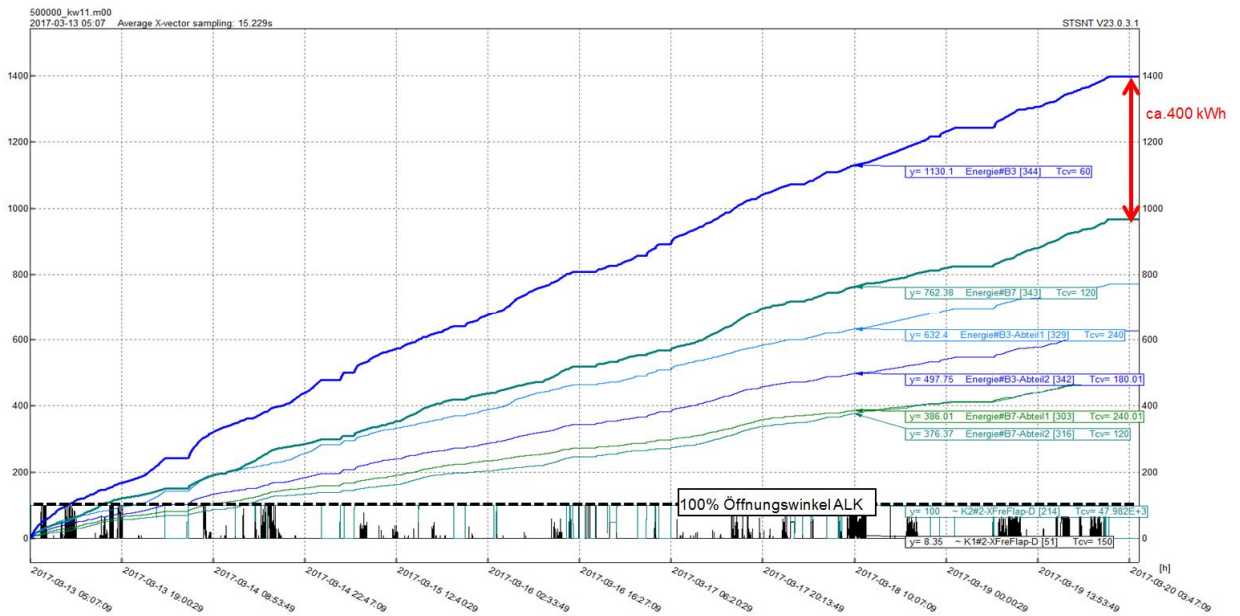


Abbildung 5: Vergleich der kumulierten Energieverbräuche vom 13.3.2017 bis 20.3.2017 von zwei ICN 2.-Klasse-Wagen: Wagen B7 mit aktiver CO₂-Regelung, Wagen B3 mit deaktivierter CO₂ Regelung. Berechnung der Energie aus Produkt der Einschaltzeit mal Leistung der Heizungen. Es ergibt sich eine relative Einsparung von etwa 400 kWh zwischen den beiden Wagen für diese Woche.

Comparaison de la consommation d'énergie cumulée de deux voitures ICN de 2e classe, du 13 au 20.3.2017: voiture B7 avec régulation par CO₂ activée; voiture B3 avec régulation par CO₂ désactivée. Les courbes de la consommation d'énergie représentent le produit du temps de fonctionnement par la puissance des chauffages. On constate une économie relative d'environ 400 kWh durant cette semaine entre les deux voitures.



Abbildung 6 zeigt Energieminderkosten und Kosten der Energiesparmassnahme pro Jahr ohne Diskontierung, dargestellt in CHF. Die Break-Even-Analyse ergibt, dass die Investitionskosten nach 10 Jahren (mit Beiträgen BAV) bzw. nach 11 Jahren (ohne Beiträge BAV) durch die Energieminderkosten ausgeglichen werden.

Graphique pluriannuel de la réduction des coûts d'énergie et des montants imputables aux mesures prises pour l'économie d'énergie, en CHF. L'analyse de rentabilité montre l'amortissement des coûts d'investissement grâce à la réduction des coûts d'énergie après 10 (avec le soutien de l'OFT) ou 11 ans (sans le soutien de l'OFT).
