



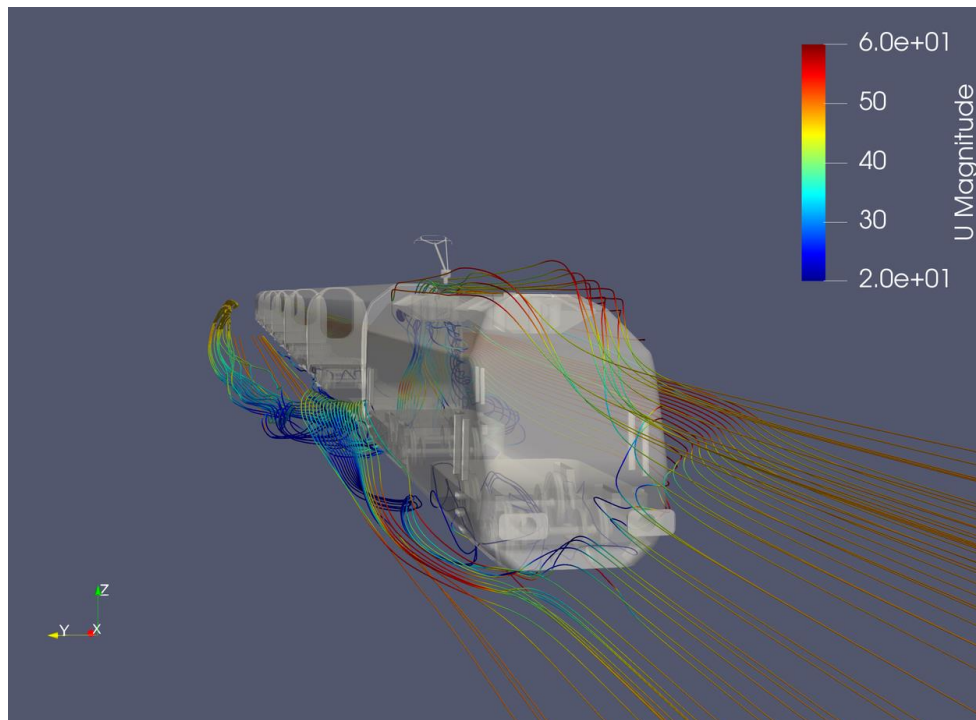
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

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

Potenzialanalyse aerodynamische Optimierung IC 2000 AD-Wagen

Schlussbericht



Orhan Sylejmani, SBB Schweizerische Bundesbahnen AG / Personenverkehr / Flottentechnik
Industriestrasse 153 · 4600 Olten · Schweiz, orhan.sylejmani@sbb.ch, www.sbb.ch

Johannes Estermann, SBB Schweizerische Bundesbahnen AG / Personenverkehr / Flottentechnik

Wylersstrasse 125 · 3000 Bern 65 · Schweiz, johannes.ester mann@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: 6

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 20.03.2020

Inhalt

Executive Summary in Deutsch	1
Résumé en français	2
Executive Summary in English.....	2
Zusammenfassung in Deutsch.....	3
1. Ausgangslage.....	3
2. Ziele der Arbeit	3
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand	3
4. Ergebnisse.....	4
5. Diskussion	13
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	14
Zusammenfassung in einer zweiten Landessprache	14
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	19
Anhang	19

Executive Summary in Deutsch

Die IC 2000 Doppelstock-Fernverkehrszüge bilden mit der Re 460 Lokomotive das Rückgrat des Fernverkehrs der SBB. Der aerodynamisch nicht besonders gestaltete Übergang zwischen der Lokomotive und dem ersten Wagen nach der Lok, dem AD-Wagen, ist historisch bedingt. Lok und Wagen wurden zeitlich getrennt voneinander beschafft. Diese Studie dient der Potentialanalyse möglicher Energieeinsparungen einer aerodynamischen Anpassung des Übergangs zwischen Lok und Wagen.

Um herauszufinden, wie viel Platz für mögliche Optimierungen am Wagen besteht, wurden zunächst zwei verfügbare geometrische Bauräume für mögliche Anpassungen ermittelt. Ein Bauraum für das aktuelle Rangierkonzept, ein weiterer Bauraum unter der Annahme, dass die AD-Wagen nur noch mit einstöckigen Wagen am Wagenende des Gepäckabteils gekuppelt werden dürfen. Mittels Strömungssimulationen wurden anschliessend Spoilerformen entwickelt und die resultierenden Fahrwiderstände des Zuges berechnet. Aus der Reduktion des aerodynamischen Widerstands wurde eine Reduktion des Energiebedarfes ermittelt. Unter Beibehaltung des aktuellen Rangierkonzepts wären die Energieeinsparungen jedoch zu klein, als dass sich eine vertiefte Analyse gelohnt hätte. Kann das Rangierkonzept angepasst werden, so werden die Energieeinsparungen auf 1.9 GWh pro Jahr geschätzt.

Unter den getroffenen Annahmen der Lebenszyklus-Kostenanalyse (Anpassung Rangierkonzept, generelle Machbarkeit, Abhängigkeit von Projektförderung, Umsetzungsdauer) ergibt sich eine Amortisationsdauer des Projektes von ca. 23 Jahren. Trotz der tiefen Wirtschaftlichkeit wäre aus Sicht des Energiesparprogramms eine Weiterführung des Projekts auch aus Gründen der Aussenwirkung wünschenswert. Zusammen mit den Systembereichen der Flottentechnik wurde jedoch entschieden, das Projekt aufgrund der tiefen Wirtschaftlichkeit abubrechen.

Résumé en français

Les compositions IC 2000 à deux étages forment avec les locomotives Re 460 l'épine dorsale du trafic grandes lignes des CFF. La transition géométrique entre la locomotive et le premier wagon – le wagon AD – n'est pas optimale d'un point de vue aérodynamique, ceci pour des raisons historiques. En effet, la locomotive et les wagons à deux étages IC 2000 ont été acquis séparément. Cette étude fournit une analyse du potentiel des économies d'énergie possibles d'une adaptation aérodynamique de l'interface entre locomotive et wagon.

En premier lieu, deux espaces géométriques de construction ont été analysés pour déterminer les limites de conception. Un espace de construction pour le concept actuel de la manœuvre ainsi qu'un concept partant de l'hypothèse où les wagons AD peuvent être attelés uniquement à des voitures à un étage à l'extrémité du compartiment bagage.

À l'aide de simulations numériques des écoulements des fluides, plusieurs formes de diffuseur ont pu être développées et la force de traînée résultante évaluée sur la composition du train. À partir de la diminution de résistance aérodynamique, le potentiel de réduction du besoin énergétique a été déterminé. Avec le concept actuel de manœuvre, on peut s'attendre à des économies d'énergie de 1.6 GWh par an tout en conservant le concept de manœuvre actuel. Si le concept de manœuvre peut être adapté, les économies d'énergie sont estimées à 1.9 GWh par an.

Sur la base des hypothèses retenues dans l'analyse LCC (adaptation du concept de manœuvre, faisabilité générale, financement du projet, période de mise en œuvre), la période de retour sur investissement du projet est de 23 ans. Du point de vue programme d'économie d'énergie, il est donc recommandé de passer à la phase suivante. Il a cependant été décidé, en étroite collaboration avec les départements systèmes de la technique de la flotte, d'abandonner le projet en raison du manque de perspectives économiques viables.

Executive Summary in English

Together with the Re 460 locomotive, the IC 2000 double-decker long-distance trains form the backbone of SBB's long-distance services. The transition between the locomotive and the first carriage after the locomotive, the AD carriage, is not particularly aerodynamically designed for historical reasons. The locomotive and carriages were acquired at different times. This study serves to analyse the potential energy savings of an aerodynamic adaptation of the transition between locomotive and wagon.

In order to find out how much space is available on the wagon for possible optimizations, two available geometric installation spaces for possible adaptations were first determined. One installation space for the current shunting concept, another installation space under the assumption that the AD carriage may only be coupled with single-deck carriages at the end of the luggage compartment. Using flow simulations, spoiler shapes were then developed and the resulting running resistances of the train were calculated. The reduction of the aerodynamic resistance results in a reduction of the energy demand. However, if the current shunting concept is retained, the energy savings would be too small to justify a more in-depth analysis. If the shunting concept can be adapted, the energy savings are estimated at 1.9 GWh per year.

Based on the assumptions of the life cycle cost analysis (adaptation of the shunting concept, general feasibility, dependence on project funding, implementation period), the payback period of the project is approximately 23 years. Despite the low economic efficiency, from the point of view of the energy saving program, a continuation of the project would be desirable, also for reasons of external impact. However, together with the system engineers, it was decided to terminate the project due to the low economic efficiency.

Zusammenfassung in Deutsch

1. Ausgangslage

Äussere Änderungen an Fahrzeugen unterliegen hohen Sicherheits- und Zulassungsanforderungen. Neben den Abklärungen der Zulassungsfähigkeit war zu Beginn der Studie nicht klar, wie viel geometrischer Raum an der Stirnwand des IC 2000 AD-Wagens Richtung Lok für eine aerodynamische Optimierung zur Verfügung steht und ob die Wagenkastenstruktur ein entsprechendes Anbauteil dauerhaft tragen kann. Ist der geometrische Raum bestimmt, kann die Energieeinsparung mittels Strömungssimulation genauer abgeschätzt werden. Eine erste Abschätzung des Energiesparpotentials prognostizierte 7 bis 12 GWh pro Jahr. Diese Aussage galt es zu verifizieren und zu vertiefen. Für die geometrische Abschätzung und die Strömungssimulation fehlen der SBB die nötigen Ressourcen, daher wurden mittels Ausschreibung Partner gewählt. Für die Strömungssimulationen werden exakte 3D Modelle der Fahrzeuge benötigt. Dazu werden die vorhandenen Modelle der IC 2000 Fahrzeugkomposition und der Re 460 Lokomotive mit Daten eines 3D Scans aufbereitet.

Der AD-Wagen, ein Erste-Klasse-Wagen mit Multifunktionstoilette im Unterdeck, ist im täglichen Einsatz immer als erstes Fahrzeug nach der Lokomotive Re 460 im Zug eingereiht. Er verfügt über ein Gepäckabteil in dem der Lok zugewandten Wagenende und ist mit einem Lift für die Minibar ausgestattet.

2. Ziele der Arbeit

Unter Berücksichtigung des verfügbaren Bauraums soll eine Strömungssimulation die möglichen Einsparungen aufzeigen. Der zur Verfügung stehende geometrische Raum soll unter Berücksichtigung normativer Vorgaben, der SBB Regelwerke und verschiedener Betriebsszenarien (Kuppelbarkeit mit unterschiedlichen Wagen) definiert werden. Durch Entwurf geeigneter aerodynamisch optimierter Anbauteile für das Fahrzeug soll eine Strömungsberechnung die aerodynamische Widerstandsreduktion aufzeigen. Aus der Reduktion des Widerstandsbeiwertes kann proportional die Reduktion des Energiebedarfes berechnet werden. Mit Hilfe einer Lebenszyklus-Kostenanalyse soll die Machbarkeit des Projekts unter Berücksichtigung verschiedener Einflüsse abgeschätzt werden. Am Ende dieser Studie soll ein Entscheid gefällt werden können, ob das Projekt in die nächste Phase übergehen soll. Eine Festigkeitsanalyse des Wagenkastens wurde aufgrund der hohen Anforderungen an eine solche Abklärung zugunsten einer fundierten Aussage zum Energiesparpotenzial zurückgestellt.

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Aufbereitung der Fahrzeugmodelle

Für die Abschätzung der geometrischen Räume und die aerodynamischen Untersuchungen werden entsprechende 3D CAD-Modelle benötigt. Einige Modelle waren aus vergangenen Projekten vorhanden, andere mussten ergänzt werden. Hierzu wurden 3D Scans der Lok Re 460 erstellt.

Geometrische Freiraumuntersuchung

Die IC 2000-Kompositionen verkehren im Normalbetrieb als einheitliche Kompositionen, wobei der AD-Wagen immer direkt an die Lokomotive gekuppelt ist. In Ausnahmefällen kann der AD-Wagen aber auch an anderer Stelle eingereiht sein. Zudem besteht die Möglichkeit, dass der AD-Wagen für Überführungen und zwecks Rangierfahrten mit anderen Fahrzeugen gekuppelt wird. Somit kann eine Vielzahl von Kupplungspartnern an die AD-Wagen auf Seite Gepäckabteil vorkommen. Der vorhandene geometrische Raum hat einen grossen Einfluss auf die möglichen Einsparungen und wird durch verschiedene betriebliche und technische Anforderungen an das Fahrzeug eingeschränkt. Grundlagen für die Untersuchungen sind die Dokumente der Fahrzeuglieferanten, normative Vorgaben, SBB Regelwerke und verschiedene Betriebsszenarien (Kuppelbarkeit mit unterschiedlichen Wagen). Äussere Änderungen an Fahrzeugen, unterliegen hohen Sicherheits- und normativen Anforderungen, die bei den Untersuchungen berücksichtigt werden. Die Festigkeit der Wagenkastenstruktur darf durch die zusätzlichen Anbauteile und deren Befestigung nicht beeinträchtigt werden. Eine Festigkeitsrechnung gemäss Projektplan (Kap 5.2, Meilenstein 4), wird jedoch erst mit dem Start der Grobkonzeptphase beauftragt.

Aerodynamik Simulation

Die Strömungsberechnungen werden mit der Software OpenFoam und eigens entwickelten «Solvern» der Lieferantin durchgeführt. Es handelt sich um RANS-Berechnungen, sogenannten «Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations». Inkompressibilität und gängige Turbulenzmodelle werden in der Berechnung angenommen. Es werden statische Berechnungen durchgeführt, welche mit begrenztem Aufwand schnelle Erkenntnisse liefern. Zunächst wird die Ausgangskonfiguration bestehend aus einer sechsteiligen unveränderten IC 2000 Komposition mit einer Re 460 Lok simuliert. Daraufhin wird mit Hilfe der Adjoint-Methode der bestmögliche Spoiler im verfügbaren geometrischen Bauraum entwickelt. Hier handelt es sich um einen iterativen Prozess zwischen mathematischen Berechnungen des Tools und manueller Überprüfung durch die Experten. Die Spoiler werden daraufhin in die Strömungssimulationen integriert und die resultierenden Widerstandsbeiwerte berechnet. Aus dem Vergleich mit der Ausgangskonfiguration lassen sich Minderungen im Gesamtwiderstandsbeiwert ablesen. Für die Verifizierung des Strömungsfeldes wird eine «Delayed Detached Eddy Simulation» (DDES) eingesetzt. Im Unterschied zur RANS-Methode werden «Delayed Detached Eddy Simulationen» transient gerechnet, was deutlich aufwändiger ist. Diese liefern aber detailliertere und zeitlich abhängige Erkenntnisse des Strömungsfelds.

4. Ergebnisse

Freiraumuntersuchung

Die Untersuchung unter Voraussetzung einer uneingeschränkten Kuppelbarkeit des AD-Wagens zeigt, dass ausgehend von den IC 2000 Wagen mit Wagenübergang und Abdeckplatte, wie auch durch die standardisierten UIC-Wagenübergänge (etwa eines DPZ+ Wagens), sehr wenig Bauraum für aerodynamische Optimierungen verbleibt. Bei einer Berechnung des Bauraums ohne doppelstöckige Kuppungspartner weist die Untersuchung deutlich mehr Platz aus.

Unter der Annahme einer Einschränkung der Kupplungs-/Rangierkonzepte darf vor dem AD-Wagen kein doppelstöckiges Fahrzeug gekuppelt werden. Durch die Einschränkung der Kuppelbarkeit des AD-Wagens ergab sich im mittleren Bereich des Bauraums mehr nutzbares Volumen (Abbildung 1 rechtes Bild).

Abbildung 2 zeigt auf der linken Seite, dass der verfügbare Bauraum stark eingeschränkt durch die Rangierkonzepte der SBB ist. Im mittleren Bereich des Bauraums ist wenig Raum für Optimierungen verfügbar. Hier sind jedoch sehr grosse Einflüsse auf die Strömungsablösung an der Kante zum Wagendach zu erwarten.

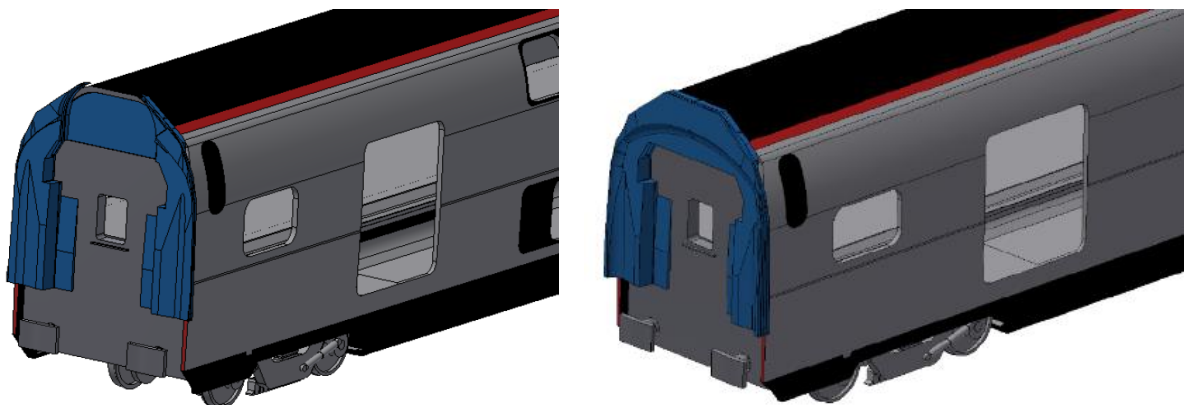


Abbildung 1 zeigt die beiden verfügbaren Bauräume am IC 2000 AD-Wagen. Links: kleinerer Bauraum mit Doppelstockfahrzeugen als Kuppungspartner. Rechts: grösserer Bauraum nur mit einstöckigen Fahrzeugen als Kuppungspartner.

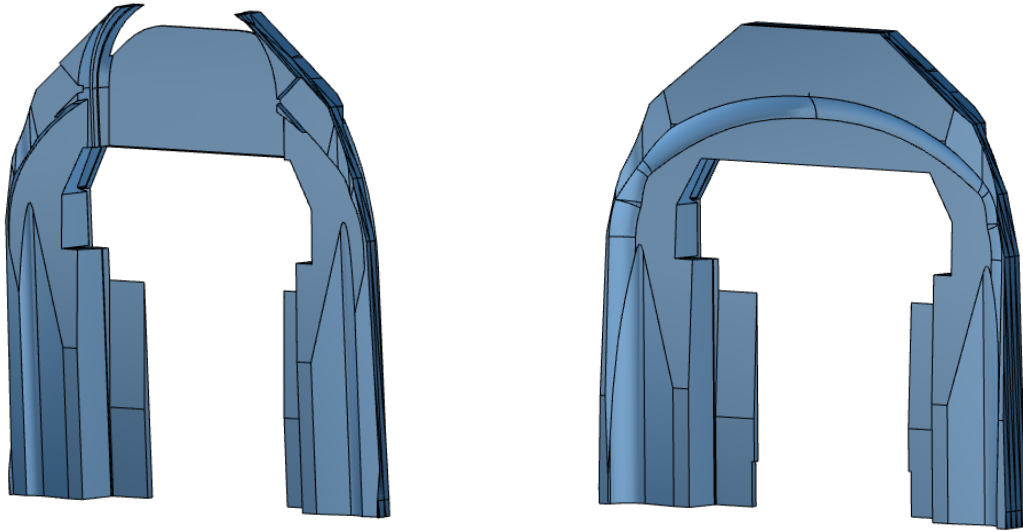


Abbildung 2 Links: Bauraum ohne Einschränkung der Kuppelbarkeit. Rechts: Bauraum mit Einschränkung der Kuppelbarkeit, ohne Doppelstockfahrzeuge als Kupplungspartner.

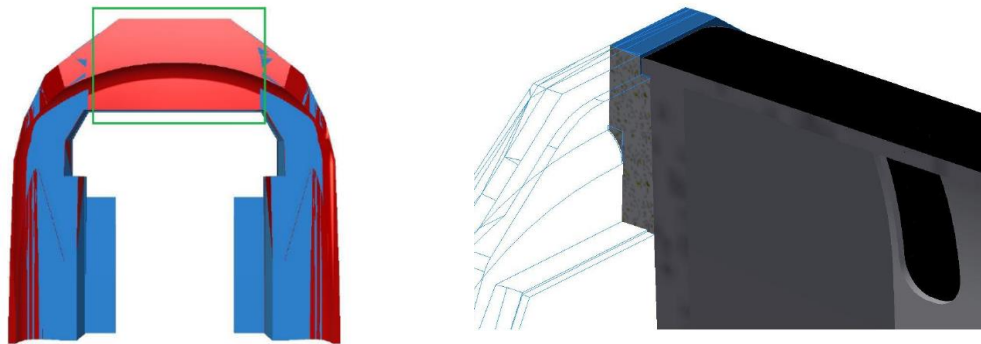


Abbildung 3 Links: Vergleich der beiden Bauräume. Blau: Bauraum mit Doppelstockfahrzeugen. Rot: Bauraum nur mit einstöckigen Fahrzeugen als Kupplungspartner. Rechts: Längsschnitt, Anbindung des grossen Bauraums an die Stirnwand des AD-Wagens.

3D-Scan der Re 460 Lokomotive

Für die Re 460 Lokomotive waren keine genügenden 3D Modelle vorhanden, daher mussten Teile der Lokomotive für die Lieferantin der Strömungssimulation ausgemessen werden. Die SBB besitzt einen 3D Handscanner, mit dessen Hilfe Detailaufnahmen der Lokomotive hergestellt wurden. Der Scanner erzeugt eine Datenpunktwolke, welche durch die Lieferantin in ein 3D Modell umgewandelt wurde. Das bestehende Modell der Lokomotive wurde durch die 3D-Scans in der Abbildung 4 ergänzt.

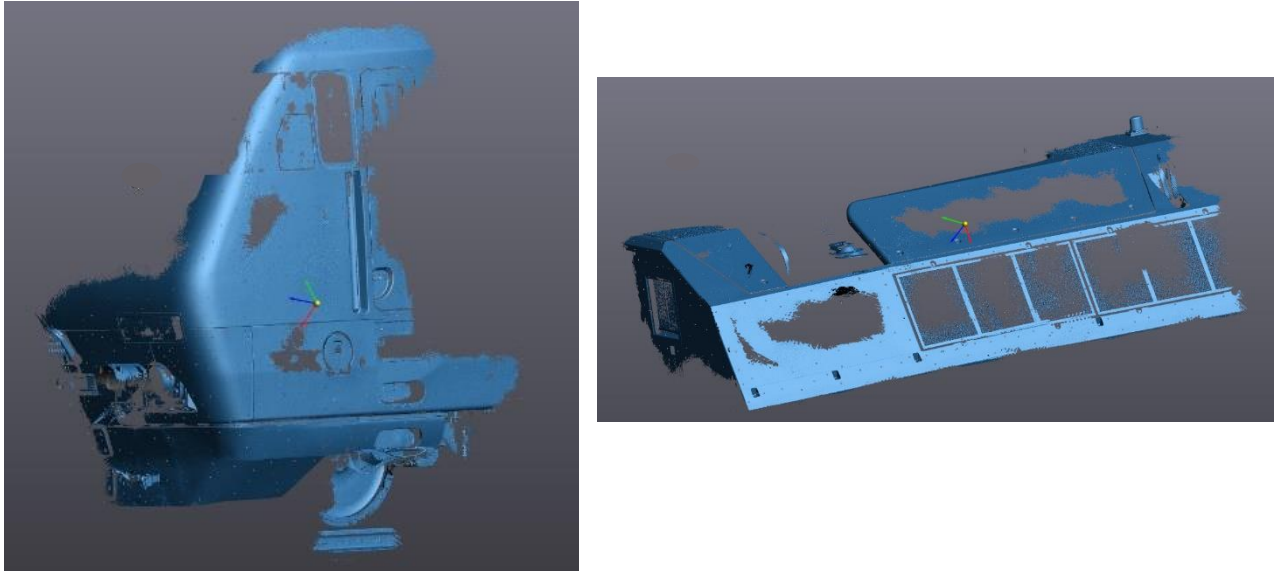


Abbildung 4: 3D-Scans der Re460 Lokomotive. Links ein Teil der Fahrerkabine, rechts Details der Dachverkleidung mit dem Ausschnitt für den Pantograf.

Aerodynamische Ergebnisse

Mit der Strömungssimulation wurden drei kritische Bereiche der Aerodynamik festgestellt, welche durch einen Spoiler zu beeinflussen sind. Bei den folgenden Bildern handelt es sich um diverse Schnittbilder aus den RANS Berechnungen. Diese wurden für die Geschwindigkeit von 180 km/h und mit ziehender Lok (Vorwärtsfahrt) berechnet. Diese Bilder dienen lediglich der Veranschaulichung der kritischen Bereiche. Für die Einsparungsberechnung wurden Simulationen von 80 km/h bis 200 km/h in 20 km/h Schritten sowohl für Vorwärts- als auch für Rückwärtsfahrt berechnet und analysiert. Die Skalierung zeigt den normierte Totaldruckdifferenz, welcher als Mass der Energieverluste zu interpretieren ist, je Dunkelblauer die Farbgebung im Bild umso mehr Druckverlust und damit Energieverlust wird generiert. Rot zeigt den maximal vorhandenen Druck des umgebenden Fluids bei den vorgegebenen Bedingungen.

Zu erkennen ist eine Strömungsablösung an der Kante des Übergangs der AD Stirnwand zum Wagendach, welche zu massiven Energieverlusten führt (Abbildung 5). Dabei handelt es sich um den offensichtlichsten Verlustanteil.

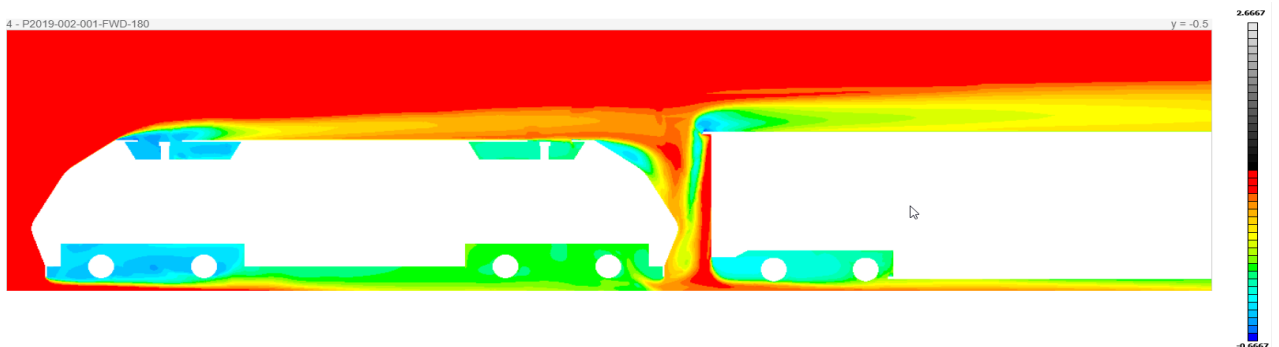


Abbildung 5 Strömungsablösung an der Kante des Übergangs der AD Stirnwand zum Wagendach in der Ausgangskonfiguration ohne Spoiler. Farblich dargestellt ist die normierte Totaldruckdifferenz, welche als Mass der Energieverluste zu interpretieren ist.

Zweitens wurde festgestellt, dass die Lokomotive in Vorwärtsfahrt Wirbelschleppen links und rechts entlang der Wagen generiert (Abbildung 7), welche grosse Energieverluste nach sich ziehen.

Drittens wurde ein verlustreicher Wirbel zwischen der Lok und dem AD-Wagen (Abbildung 6) gefunden. Die Wirbelschleppe, welche die Re 460 aufgrund ihres unebenen Bodens generiert ist in Abbildung 7 zu sehen und kann ebenfalls durch den Spoiler verbessert werden.

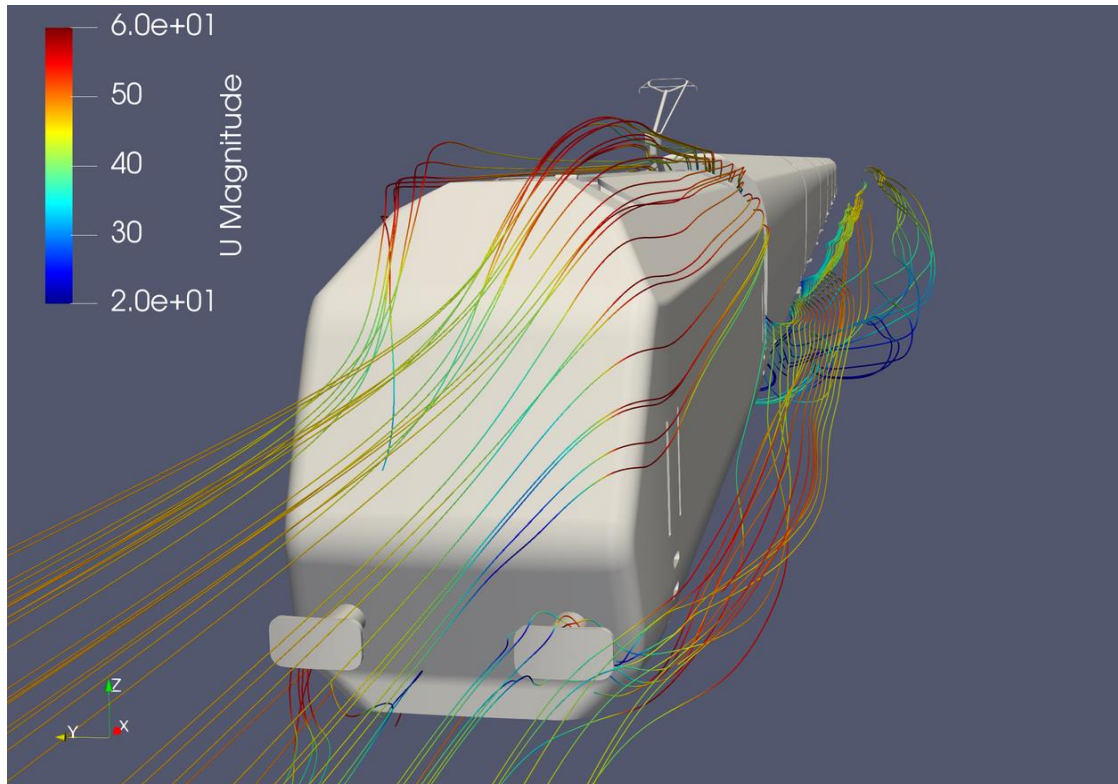


Abbildung 7 Wirbelschleppe seitlich des Zuges bei Vorwärtsfahrt. Die Farbverteilung der Stromlinien zeigen die normierte Geschwindigkeit. Rot ist die maximale Geschwindigkeit des Fluids, blau zeigt Reduktionen der Geschwindigkeit aufgrund von Wirbelbildung.

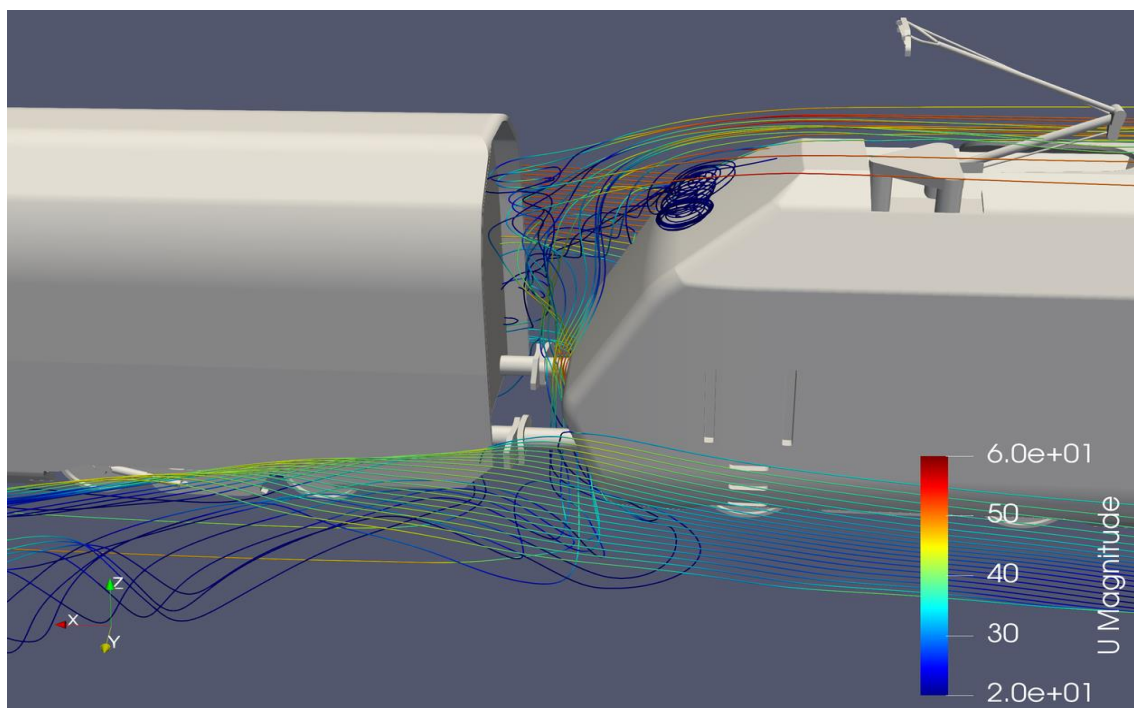


Abbildung 6 Wirbelbildung zwischen Re 460 und folgendem AD-Wagen. Die Farbverteilung der Stromlinien zeigen die normierte Geschwindigkeit. Rot ist die maximale Geschwindigkeit des Fluids, blau zeigt Reduktionen der Geschwindigkeit aufgrund von Wirbelbildung.

Aerodynamische Optimierung

Mit der Aufgabe den besten Spoiler für beide verfügbaren Bauräume zu entwickeln, hat die Lieferantin folgende zwei Lösungen für die Bauräume errechnet. Die Abbildung 8 zeigt den bestmöglichen gefundenen Spoiler für den Bauraum ohne Einschränkung der Kuppelbarkeit.

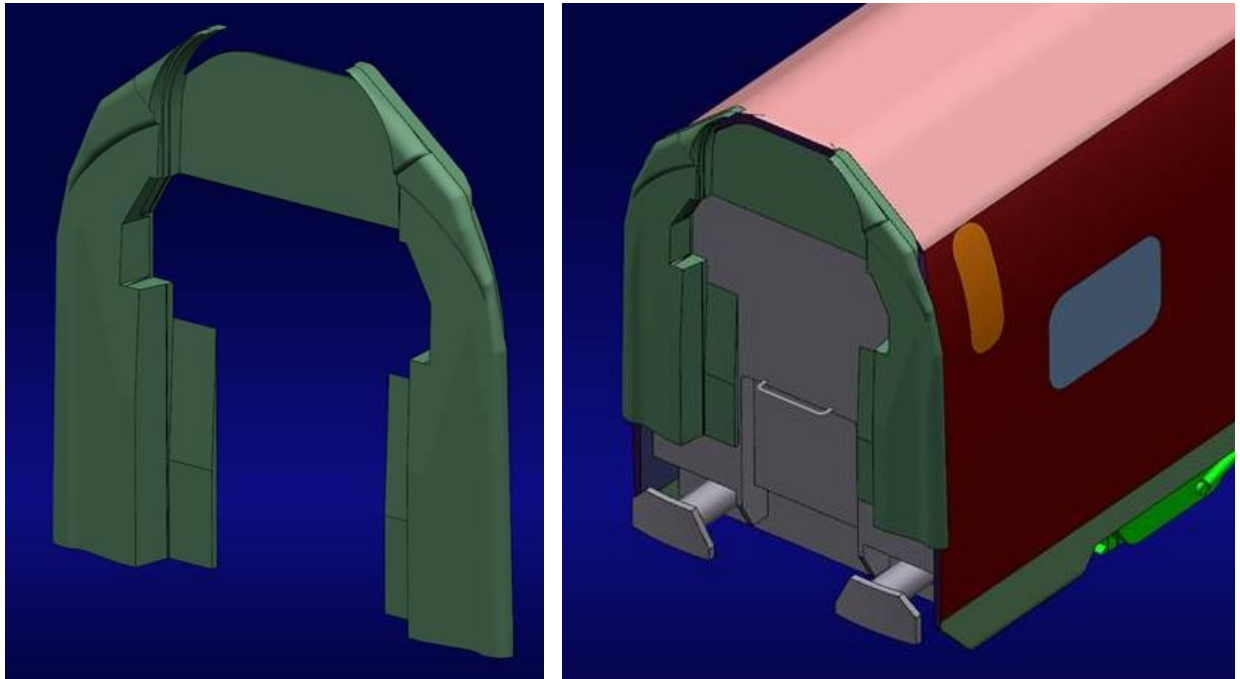


Abbildung 8 Bestmöglicher Spoiler für den Bauraum ohne Einschränkung der Kuppelbarkeit.

Mit diesem Spoiler wurde eine Minderung des Widerstandsbeiwertes von 1.6% für den gesamten Zug berechnet. Der bestmögliche gefundene Spoiler für den Bauraum mit Einschränkung der Kuppelbarkeit ist in Abbildung 9 gezeigt und wird im Folgenden als Spoiler 13 bezeichnet.

Mit dem Spoiler in Abbildung 9 ist eine Minderung des Widerstandsbeiwertes des ganzen Zugs von 6.9% möglich.

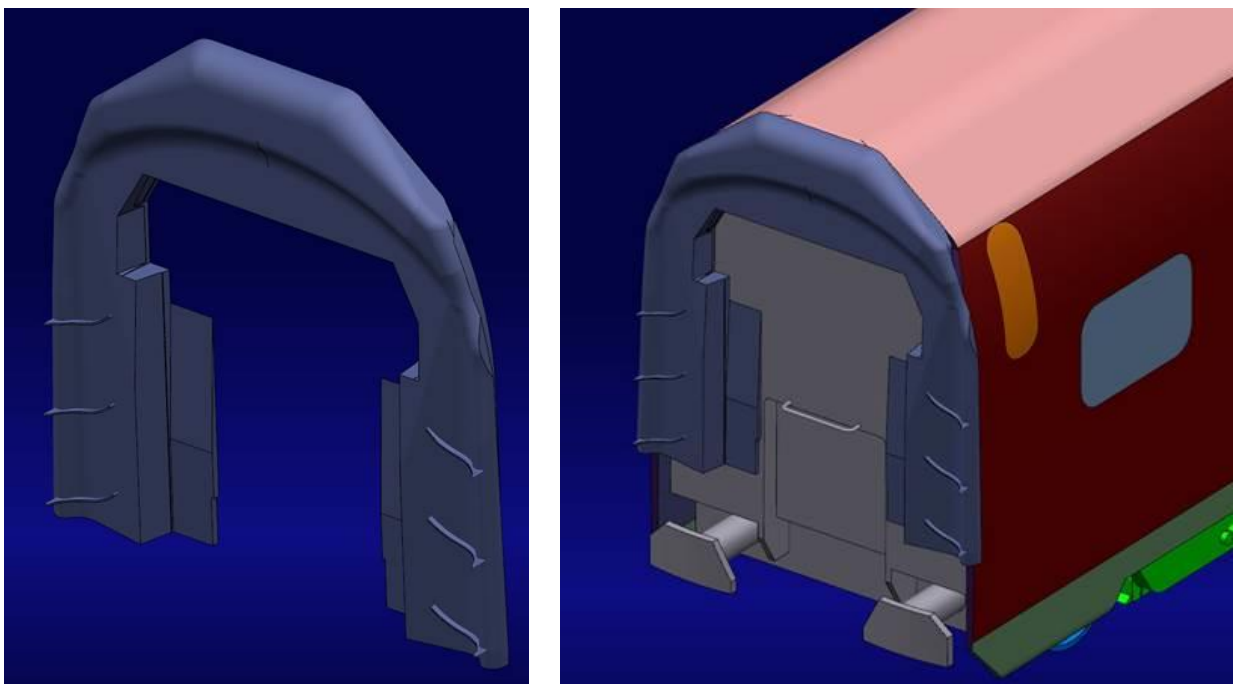


Abbildung 9 Bestmöglicher Spoiler für den Bauraum mit Einschränkung der Kuppelbarkeit.

Der Zug hat nicht die gleiche geometrische Querschnittsfläche bei Vorwärts- oder Rückwärtsfahrt. Dementsprechend ist auch der Widerstandsbeiwert richtungsabhängig. Die Widerstandsbeiwerte werden für beide Fahrtrichtungen berechnet und die Einflüsse in der Einsparungsberechnung berücksichtigt.

Beide Spoilerformen haben einen positiven Einfluss auf den Widerstandsbeiwert des Zuges. Im Folgenden werden die Resultate des grossen Bauraums analysiert, seine Einflüsse sind ausgeprägter und daher besser aufzuzeigen.

Spoiler 13 hat einen mindernden Einfluss auf die Strömungsablösung entlang der Kante der AD-Stirnwand zu Dach und Seitenwänden des Wagens. Die Abbildung 10 zeigt diese Verbesserung des Totaldruckunterschiedes. Im oberen Bild der Abbildung 10 reisst die Strömungsablösung an der Kante stark ab und generiert so erhebliche Verluste (blaue Färbung), es handelt sich um die Komposition wie sie heute im Betrieb ist. Im unteren Bild ist der Spoiler 13 in der Simulation integriert, dieser lenkt die Strömung optimaler und reduziert die Strömungsverluste.

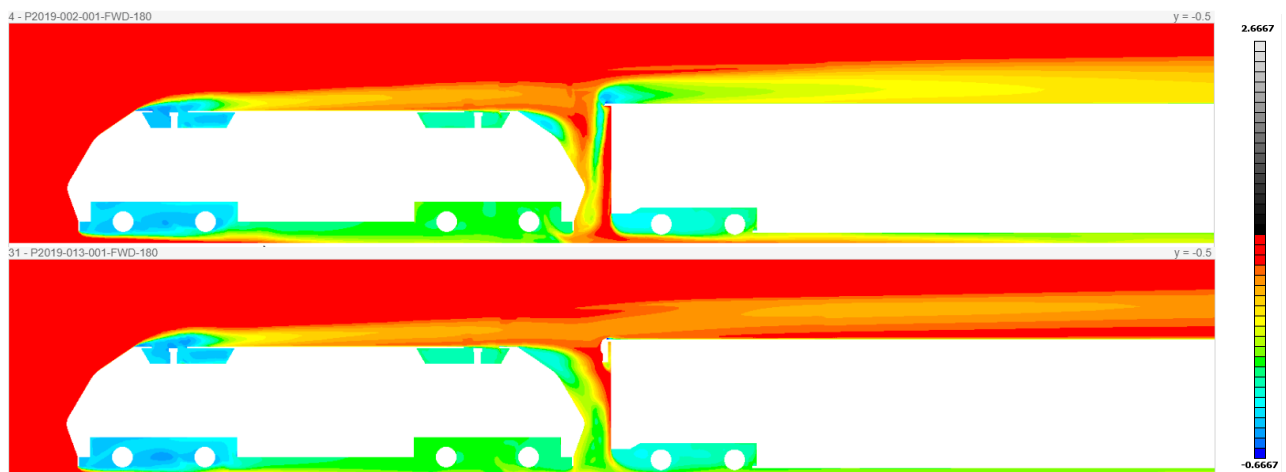


Abbildung 10 Die Strömungsablösung wird positiv beeinflusst durch den Spoiler. Bild oben: Strömungsablösung der heutigen Komposition. Bild unten: Komposition mit Spoiler des grossen Bauraums. Die Strömungsablösung entlang des Daches des AD-Wagens ist fast nicht mehr vorhanden. Die Skala zeigt die normierte Totaldruckdifferenz. Je tiefer die Farbe umso mehr werden Energieverluste generiert.

Der Spoiler beeinflusst auch die Ausbreitung der Wirbelschlepe am Boden der Lok. Abbildung 11 zeigt einen Schnitt orthogonal zur z-Achse in der Höhe von 0.8 Meter über Schienenoberkante. Im oberen Bild ist der heutige Zustand zu sehen. Vergleichen wir dies mit der Simulation, welche den Spoiler 13

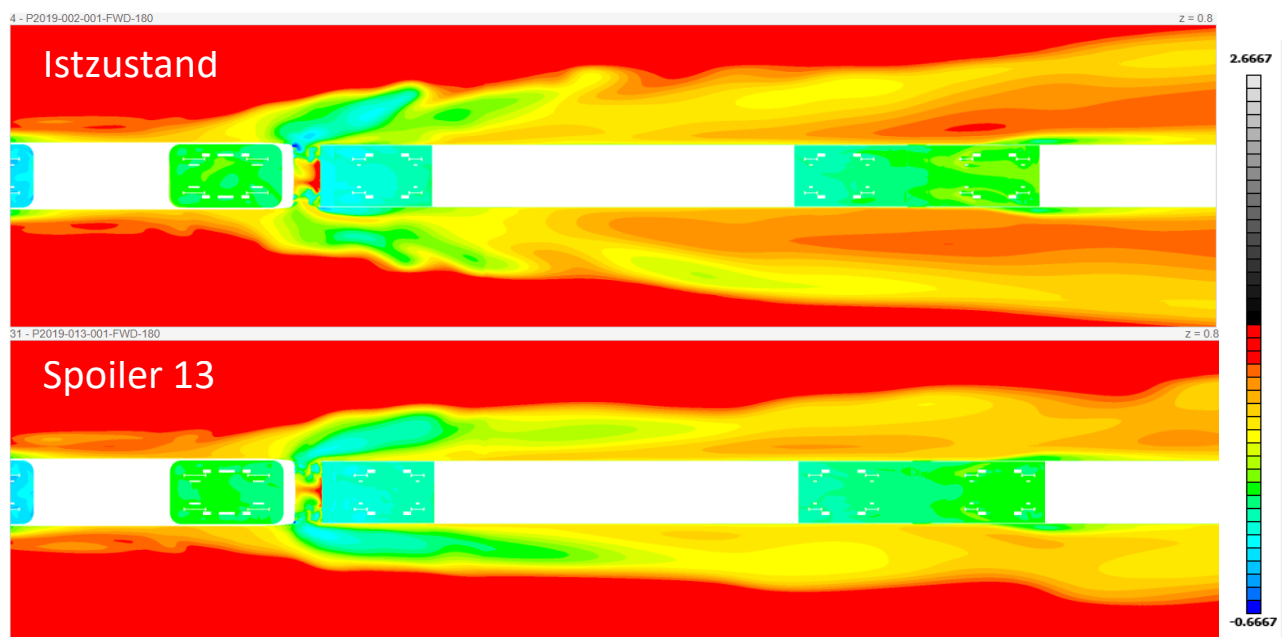


Abbildung 11 Schnittbild orthogonal zur z-Achse, 0.8 m über Schienenoberkante, normierte Totaldruckdifferenz. Fahrtrichtung von rechts nach links mit 180 km/h, ziehende Lok. Oberes Bild ohne Spoiler, unteres Bild mit Spoiler 13. Die Ausbreitung der Wirbelschlepe seitlich der Komposition ist im unteren Bild enger am Zug anliegend.

beinhaltet (Abbildung 11 unten) ist zu sehen, dass die Ausbreitung der Wirbelschleppes durch den Spoiler verengt wird. Der Spoiler beeinflusst also die Druckdifferenz (weniger gelb gefärbte Flächen) und die Fläche (enger anliegende Strömung am Zug) zu Gunsten der Energieverluste.

Die Bilderserie in Abbildung 12 zeigt die Ausprägung des Wirbels im Zwischenbereich von Lok und AD-Wagen sowie die Wirbelschleppes seitlich der Komposition. In der Bilderserie handelt es sich um Bilderschnitte orthogonal zur x-Achse. Startend vom hinteren Ende der Lokomotive bewegen sich die Bilder in gleichmässigem Abstand in Richtung der AD-Wagen. Der Druckunterschied ist in den Bildern mit Spoiler 13 sehr viel tiefer. Auch der Druckunterschied der Wirbelschleppes seitlich am Boden der Lok sind viel tiefer.

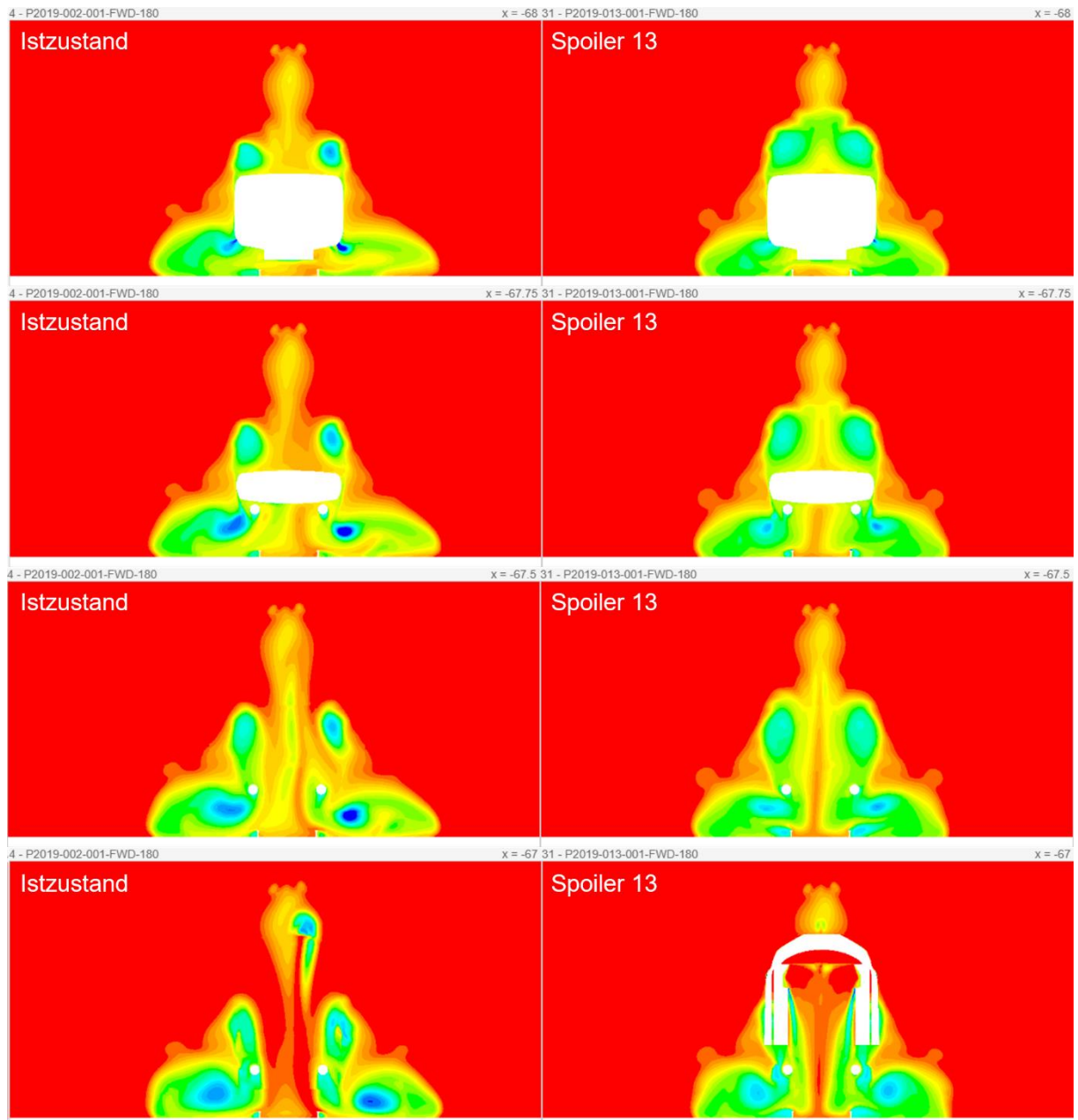


Abbildung 12: Schnittbilder orthogonal zur x-Achse zwischen der Re 460 und dem AD-Wagen, startend vom Ende der Lok (erste Reihe) bis zum Spoiler des AD-Wagens (untere Reihe). Normierte Totaldruckdifferenz. Die Wirbelausprägung zwischen den Fahrzeugen aber auch am Boden links und rechts des Zuges ist in den Bildern mit Spoiler 13 sehr viel tiefer.

Energiesparpotenzial

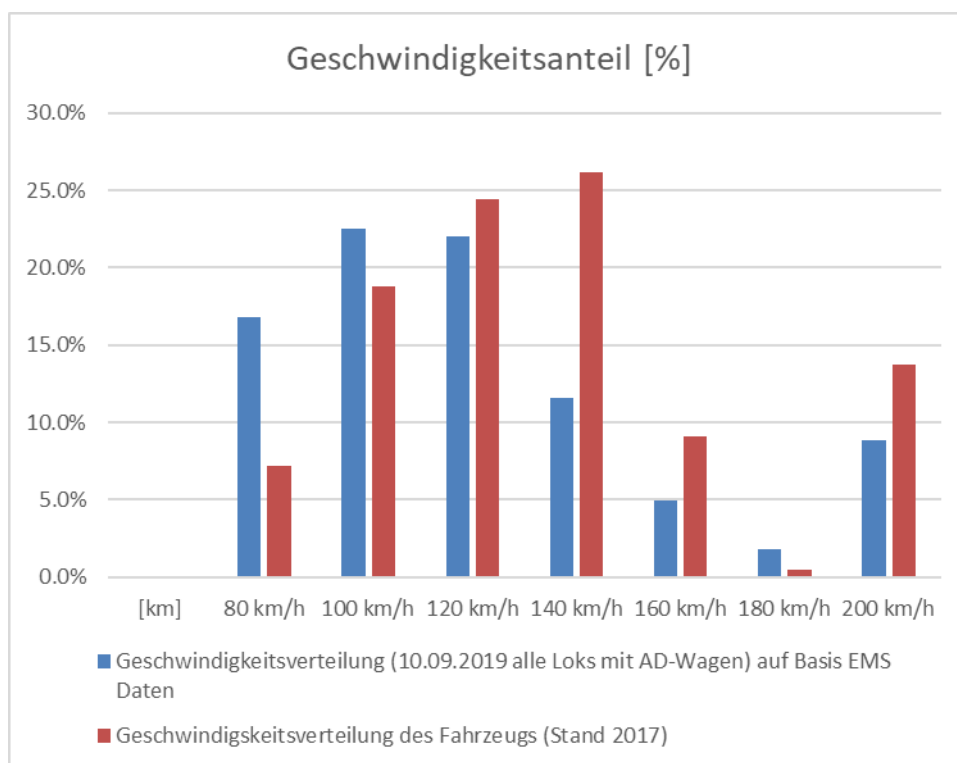
Gemäss dem Bericht der Lieferantin sind die RANS Berechnungen massgebend für die Energiespar-Potentialanalyse. Das Potential der Energieeinsparung wird mit den Berechnungen im Anhang (Einsparungsberechnung) errechnet. Für die Berechnungen wurden konstante Widerstandsbeiwerte angenommen. In der Simulation bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 180 km/h hat die Komposition folgende Widerstandsbeiwerte:

$c_{d,Vorwärts}$ der aktuellen Komposition	13.5
$c_{d,Vorwärts}$ mit Spoiler 13	12.6
$c_{d,Rückwärts}$ der aktuellen Komposition	12.0
$c_{d,Rückwärts}$ mit Spoiler 13	11.3

Tabelle 1 Vergleich der verschiedenen Widerstandsbeiwerte

Jeder AD-Wagen legt jährlich ca. 360'000 km zurück. Die Geschwindigkeitsverteilung der Fahrzeuge kann anhand von Daten aus dem Energiemesssysteme (EMS) abgeschätzt werden. Das EMS zeichnet im Minutentakt die Geschwindigkeit und die zurückgelegte Strecke auf. Daraus lässt sich eine Geschwindigkeitsverteilung ableiten.

In einer ersten Abschätzung des Einsparpotenzials wurde mit einer Geschwindigkeitsverteilung auf Basis der zulässigen Geschwindigkeit je Streckenabschnitt gerechnet. In der Realität fahren die Fahrzeuge jedoch deutlich tiefere Geschwindigkeiten, daher ergibt sich eine Reduktion der Einsparung.



Die Einsparungen für Vorwärts- und Rückwärtsfahrt werden aufaddiert. Da es sich um Pendelumläufe handelt verkehren die Fahrzeuge immer gleich oft Vorwärts wie Rückwärts. Die jährlichen Energieeinsparungen mit Spoiler 13 wird für Vorwärtsfahrt auf 1.47 GWh und für Rückwärtsfahrt auf 0.42 GWh berechnet.

Die DDES Simulationen (Abbildung 13) wurden für die Überprüfung der RANS Berechnungen erstellt. Sie weisen keine höhere Genauigkeit als die RANS Simulationen auf, liefern aber eine detailliertere visuelle Übersicht über das Strömungsfeld. Grundsätzlich wurden mittels DDES Simulation die Ergebnisse der RANS Berechnungen bestätigt.

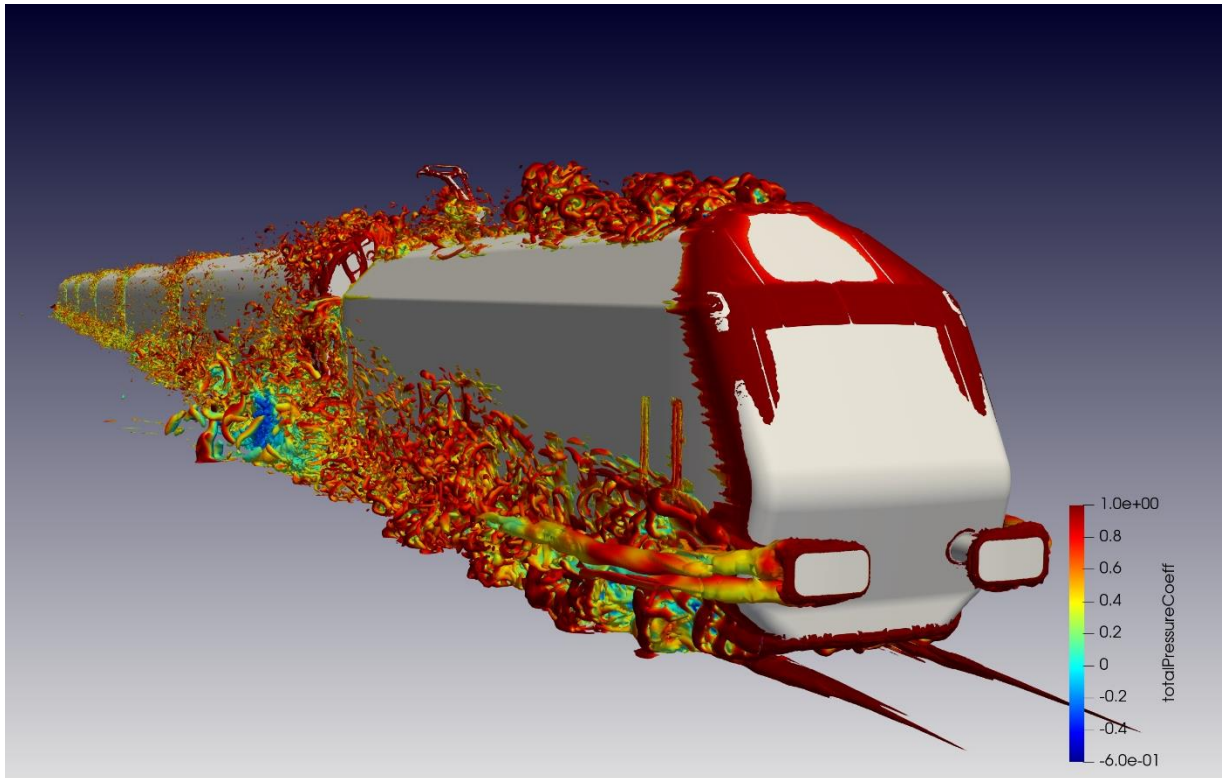


Abbildung 13: Die DDES Simulationen liefern eine detailliertere visuelle Übersicht des Strömungsfeldes

5. Diskussion

LCC-Analyse

Mit Hilfe der Lebenszyklus-Kostenanalyse (LCC-Analyse) wird die Rentabilität des Projekts abgeschätzt. Massgebend sind die Entwicklungs- und Serienkosten der Spoiler, die erwarteten Einnahmen durch Energieminderkosten sowie der Umsetzungszeitraum. Das Projekt wird in drei Phasen gegliedert: Studie, Grobkonzept und Realisierung. Die Kosten der Studienphase sind mit diesem Bericht bekannt und realisiert.

Um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern war geplant, Anträge für öffentliche Förderungen (Programm ESöV des BAV für Unterstützung eines Prototyps, ProKilowatt des BFE für Unterstützung der Serienfertigung, Klimafonds der SBB für Unterstützung eines Prototyps) einzureichen.

Um Unsicherheiten bei der Energieeinsparung als auch bei den Kosten zu berücksichtigen wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Energieeinsparungen werden um 80% reduziert, um mögliche Einschränkungen der Realisierbarkeit eines Spoilers oder geringere tatsächlich gefahrene Geschwindigkeiten zu berücksichtigen. Dabei wird zugrunde gelegt, dass Spoiler 13 realisiert werden soll, was eine Anpassung des Rangierkonzepts voraussetzt. Andererseits wurden die erwarteten Kosten für die Entwicklung und Serialisierung eines Spoilers auf 120% erhöht. Somit ergibt sich eine Bandbreite der zu erwartenden Amortisationsdauer.

Unter diesen Annahmen beträgt die Paybackdauer ca. 23 Jahre, in Anbetracht der voraussichtlichen Nutzungsdauer der Fahrzeuge von 24 Jahren ein äusserst knapper Wert. Das bestätigt auch die Sensitivitätsanalyse des Projekts, die Wirtschaftlichkeit wird massgeblich durch die Höhe der Energieeinsparung beeinflusst. Je nach Projektverlauf werden die Energiekosten und Kosten für die Massnahmenumsetzung des Projektes in der Bandbreite von 47.5 Mio. CHF bis 64.6 Mio. CHF (diskontiert) erwartet. Dem gegenüber stehen Energiekosten in Höhe von 56.57 Mio. CHF (diskontiert), wenn keine Änderungen vorgenommen werden.

Trotz der tiefen Wirtschaftlichkeit wäre aus Sicht des Energiesparprogramms eine Weiterführung des Projekts auch aus Gründen der Aussenwirkung wünschenswert. Zusammen mit den Systembereichen der Flottentechnik wurde jedoch entschieden, das Projekt aufgrund der tiefen Wirtschaftlichkeit abzubauen.

Weitere Diskussion

Die aerodynamischen Simulationsergebnisse zeigen eine Abhängigkeit der Widerstandsbeiwerte von der Geschwindigkeit. Die Einsparungsberechnung wurde aber auf Basis der Widerstandsbeiwerte für 180 km/h gemacht.

Die Simulation wurde für eine Komposition bestehend aus einer Re 460 und sechs IC 2000 Wagen erstellt. Jedoch werden im täglichen Einsatz der SBB noch weitere Zuglängen oder auch Kombinationen mit einstöckigen Wagen eingesetzt. Dies hat einen Einfluss auf die Energieeinsparung.

Das zukünftige Einsatzprofil der IC 2000 Wagen kann sich ändern. Die mittlere Zuglänge von sechs Wagen versucht hier eine erste Abschätzung gemäss aktueller Planung zu machen. Jedoch ist nicht auszuschliessen, dass sich die Laufleistung (in km/Jahr) der Fahrzeuge verändert mit einem entsprechenden Einfluss auf die Energieeinsparungen.

Hinweise auf weitere aerodynamische Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Lokomotive Re 460 wurden im Zusammenhang der vorliegenden Untersuchungen identifiziert. Diese waren jedoch nicht im Fokus der aktuellen Studie.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Mit der vorgeschlagenen Lösung eines Spoilers für den maximalen geometrischen Bauraum werden Einsparungen von 1.9 GWh jährlich erwartet. Die Einsparungen von 1.9 GWh ergeben sich auch den 1.47 GWh (Vorwärtsfahrt) und 0.42 GWh (Rückwärtsfahrt). Unter den getroffenen Annahmen (Anpassung Rangierkonzept, generelle Machbarkeit, Abhängigkeit von Projektförderung, Umsetzungsdauer) ergibt sich eine Amortisationsdauer des Projektes von ca. 23 Jahren. Trotz der tiefen Wirtschaftlichkeit wäre aus Sicht des Energiesparprogramms eine Weiterführung des Projekts auch aus Gründen der Aussenwirkung wünschenswert. Zusammen mit den Systembereichen der Flottentechnik wurde jedoch entschieden, das Projekt aufgrund der tiefen Wirtschaftlichkeit abzuberechnen.

In einem nächsten Schritt müsste die statische Beschaffenheit des AD-Wagenkastens und die Machbarkeit eines Spoilers überprüft werden. Zusätzlich würden Abklärungen zur Änderung des Rangierkonzeptes und zum Kräfteeinfluss des Spoilers auf den Stromabnehmer nötig, bevor eine Konstruktion des Spoilers gestartet werden könnte.

Hinweise auf weitere aerodynamische Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Lokomotive Re 460 wurden im Zusammenhang der vorliegenden Untersuchungen identifiziert. Es wird die Möglichkeit in Betracht gezogen Potentialanalysen im Bereich des Unterbodens und der Puffer der Re 460 zu veranlassen.

Analyse du potentiel d'optimisation aérodynamique des voitures AD IC 2000

Executive Summary en français

Les compositions IC 2000 à deux niveaux forment, avec les locomotives Re 460, l'épine dorsale du trafic grandes lignes des CFF. Pour des raisons historiques, la transition entre la locomotive et la première voiture (voiture AD) n'est pas optimale d'un point de vue aérodynamique. En effet, la locomotive et les voitures à deux niveaux IC 2000 ont été achetées à des périodes différentes. La présente étude a pour but d'analyser les économies d'énergie possibles si l'on procède à une adaptation aérodynamique de l'interface entre la locomotive et la voiture.

Afin d'évaluer les possibilités d'optimisation sur la voiture, deux profils géométriques disponibles se prêtant à de telles adaptations ont été définis dans un premier temps: l'un est compatible avec le concept actuel de manœuvre, l'autre suppose que les voitures AD ne puissent plus être attelées qu'à des voitures à un niveau à l'extrémité du compartiment à bagages. À l'aide de simulations numériques d'écoulement des fluides, plusieurs formes de déflecteurs ont ensuite été développées et la résistance à l'avancement qui en résulte évaluée sur la composition. La réduction des besoins énergétiques a été déterminée sur la base de la diminution de la résistance aérodynamique. Si le concept actuel de manœuvre est conservé, les économies potentielles d'énergie seraient trop faibles pour justifier une analyse plus approfondie. Si le concept de manœuvre peut être adapté, les économies d'énergie pourraient s'élever à 1,9 GWh par an.

Sur la base des hypothèses retenues dans l'analyse LCC (adaptation du concept de manœuvre, faisabilité générale, sujétion aux subventions, période de mise en œuvre), la période de retour sur investissement du projet a été estimée à 23 ans environ. En dépit d'une rentabilité réduite, la poursuite du projet serait souhaitable du point de vue du programme d'économie d'énergie, notamment sur le plan de l'impact extérieur. Il a cependant été décidé, en collaboration avec les départements Technique de la flotte, d'abandonner le projet en raison du manque de perspectives économiques viables.

Potentiel d'économies d'énergie

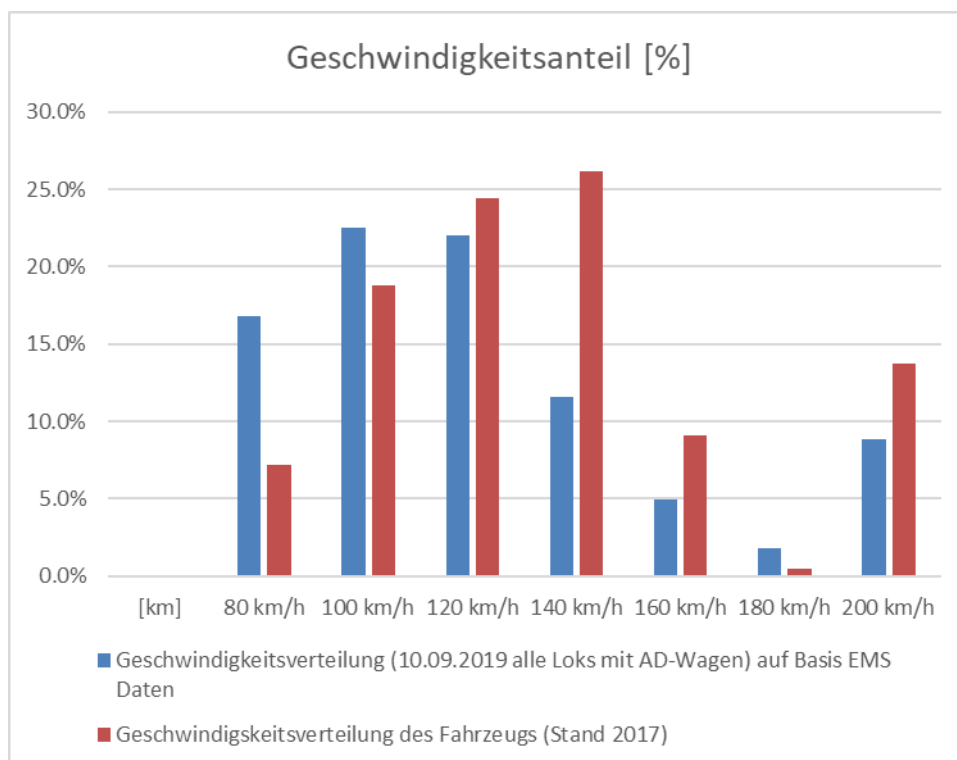
Selon le rapport du fournisseur, les calculs RANS sont déterminants pour analyser le potentiel d'économies d'énergie. Ce potentiel est calculé en appliquant les formules indiquées en annexe (calcul des économies). Les calculs reposent sur l'hypothèse de coefficients de traînée constants. Dans la simulation à une vitesse de 180 km/h, la composition présente les coefficients de traînée suivants:

$C_{d,marche\ avant}$ de l'actuelle composition	13,5
$C_{d,marche\ avant}$ avec déflecteur 13	12,6
$C_{d,marche\ arri\ere}$ de l'actuelle composition	12,0
$C_{d,marche\ arri\ere}$ avec déflecteur 13	11,3

Tableau 2 Comparaison des coefficients de traînée

Chaque voiture AD parcourt environ 360 000 km par an. La répartition des vitesses des véhicules peut être estimée à l'aide des données fournies par le système de gestion d'énergie (EMS). L'EMS enregistre toutes les minutes la vitesse et la distance parcourue. Cela permet d'en déduire la répartition des vitesses.

Lors d'une première estimation du potentiel d'économies, on est parti d'une répartition des vitesses basée sur la vitesse autorisée sur chaque tronçon. Mais en réalité, les véhicules roulent à des vitesses nettement inférieures, ce qui réduit les économies réalisées.



Les économies pour les circulations en marche avant et arrière sont additionnées. Comme il s'agit de rotations de trains-navettes, les véhicules effectuent autant de circulations en marche avant qu'en marche arrière. Les économies d'énergie annuelles avec le déflecteur 13 sont, selon les calculs, de 1,47 GWh pour les circulations en marche avant et de 0,42 GWh pour les circulations en marche arrière. Les simulations DDES (Abbildung 13) ont été établies pour vérifier les calculs RANS. Leur précision n'est pas supérieure à celle des simulations RANS, mais elles donnent un aperçu visuel plus détaillé du champ d'écoulement des fluides. De manière générale, les simulations DDES ont confirmé les résultats des calculs RANS.

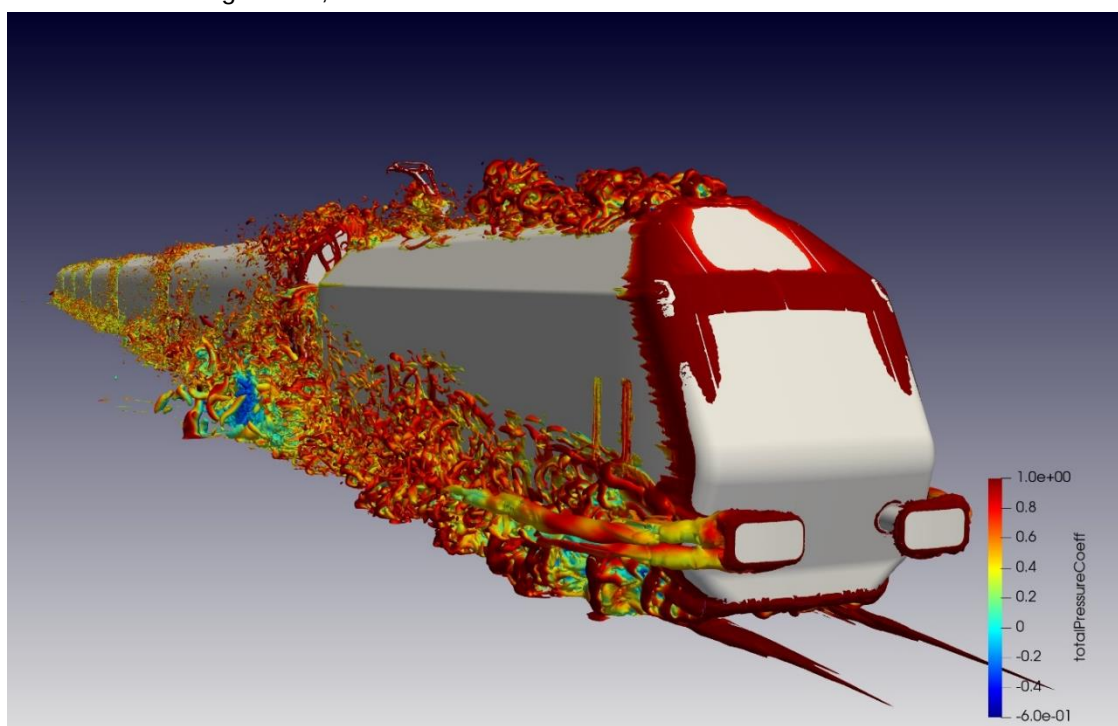


Illustration 14 – Les simulations DDES fournissent une vue d'ensemble plus détaillée du champ d'écoulement des fluides.

5. Discussion

Analyse LCC

L'analyse du coût du cycle de vie (LCC) sert à estimer la rentabilité du projet. Les frais de développement et de production en série des déflecteurs, les gains attendus du fait de la réduction des coûts énergétiques et la période de mise en œuvre sont ici déterminants. Le projet est divisé en trois phases: étude, concept sommaire et réalisation. Les frais de la phase d'étude sont connus avec l'établissement de ce rapport.

Il était prévu, pour améliorer la rentabilité, de déposer des demandes de subventions publiques (programme SETP de l'OFT pour la conception d'un prototype, ProKilowatt de l'OFEN pour la production en série, Fonds pour le climat des CFF pour la conception d'un prototype).

Afin de tenir compte des incertitudes, que ce soit au niveau des économies d'énergie ou des coûts, on s'est livré à une analyse de sensibilité. Les économies d'énergie sont réduites de 80% de manière à prendre en compte les possibles restrictions de faisabilité du déflecteur ou les vitesses effectives moindres. L'analyse est fondée sur la variante du déflecteur 13, ce qui suppose une adaptation du concept de manœuvre. Par ailleurs, les coûts attendus de développement et de production en série d'un déflecteur ont été portés à 120%. On obtient ainsi une fourchette pour évaluer la période de retour sur investissement.

Dans ces conditions, la durée d'amortissement est de 23 années environ – ce qui est considérable quand on sait que la durée d'utilisation moyenne des véhicules est de 24 ans. L'analyse de sensibilité du projet confirme elle aussi que la rentabilité dépend grandement de l'importance des économies d'énergie. Selon le déroulement du projet, les coûts d'énergie et les frais de mise en œuvre des mesures se situent dans une fourchette attendue de 47,5 à 64,6 millions de francs (valeur actualisée). Si aucun changement n'est apporté, les coûts d'énergie s'élèvent à 56,57 millions de francs (valeur actualisée).

En dépit de sa rentabilité réduite, la poursuite du projet serait souhaitable du point de vue du programme d'économie d'énergie, notamment sur le plan de l'impact extérieur. Il a cependant été décidé, en collaboration avec les départements Technique de la flotte, d'abandonner le projet en raison du manque de perspectives économiques viables.

Observations complémentaires

Les résultats de la simulation aérodynamique révèlent que les coefficients de traînée dépendent de la vitesse. Or, le calcul des économies réalisées a été opéré sur la base de coefficients de traînée pour 180 km/h.

La simulation a été établie pour une composition constituée d'une Re 460 et de six voitures IC 2000. Des rames de longueur différente circulent cependant chaque jour sur le réseau des CFF, de même que des compositions avec des voitures à un niveau. Cela influe sur les économies d'énergie.

Le profil d'utilisation des voitures IC 2000 est susceptible de changer à l'avenir. La longueur moyenne adoptée pour les trains (six voitures) a pour but de livrer une première estimation en accord avec la planification actuelle. Mais il n'est pas exclu que la prestation kilométrique des véhicules (en km/an) évolue, ce qui se répercuterait sur les économies d'énergie.

Dans le cadre de la présente analyse, d'autres possibilités d'optimisation aérodynamique ont été identifiées au niveau de la locomotive Re 460. Ce n'était toutefois pas le thème central de l'étude.

6. Conclusions et recommandations

La solution proposée de déflecteur pour le profil géométrique maximal permet de réaliser des économies attendues de 1,9 GWh chaque année. Ce chiffre de 1,9 GWh est obtenu en additionnant les économies pour les circulations en marche avant de 1,47 GWh et celles pour les circulations en marche arrière de 0,42 GWh. Sur la base des hypothèses retenues (adaptation du concept de manœuvre, faisabilité générale, sujétion aux subventions, période de mise en œuvre), la période de retour sur investissement du projet est de 23 ans environ. En dépit de sa rentabilité réduite, la poursuite du projet serait souhaitable du point de vue du programme d'économie d'énergie, notamment sur le plan de l'impact extérieur. Il a cependant été décidé, en collaboration avec les départements Technique de la flotte, d'abandonner le projet en raison du manque de perspectives économiques viables.

Lors d'une prochaine étape, il serait nécessaire de vérifier les caractéristiques statiques de la caisse des voitures AD et la faisabilité d'un déflecteur. Avant de pouvoir lancer la construction du déflecteur, il faudrait en outre tirer au clair les possibilités de modification du concept de manœuvre et l'influence des forces du déflecteur sur le pantographe.

D'autres possibilités d'optimisation aérodynamique ont été identifiées au niveau de la locomotive Re 460 dans le cadre de la présente étude. Il est envisagé de se livrer à des analyses portant sur la zone du dessous de caisse et des tampons de la Re 460.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

- RANS = Reynolds-Averaged Navier-Stokes; Die Reynolds-Averaged Navier-Stokes Gleichungen sind eine Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichung, diese wird in der numerischen Strömungsmechanik zur Approximation turbulenter Strömungen verwendet.
- DDES = Delayed Detached Eddy Simulations; Transiente numerische Simulation.
- RADN sind Streckendaten der SBB welche maximal zulässigen Geschwindigkeiten definieren.

Anhang

Die folgenden Anhänge sind nicht für die Veröffentlichung gedacht, sondern nur für die BAV interne Verwendung.

- [1] 01-03-00148 2.00 Bauraumuntersuchung Wagenfront IC 2000 für aerodynamische Optimierung des AD-Wagens, Prose AG
- [2] Bericht Sauber
- [3] LCC Analyse
- [4] Projektkosten

Einsparungsberechnung

Die Energieeinsparungen ergeben sich aus dem Unterschied der Widerstandsbeiwerte. Für die Einsparungsberechnung werden nur die aerodynamische Widerstandskräfte betrachtet, die restlichen Energieverluste im Betrieb werden als konstant angenommen und sind daher für die Rechnung nicht relevant. Die aerodynamische Widerstandskraft berechnet sich aus folgender Formel:

$$F_D = 1/2 \rho v^2 A c_d$$

Der Widerstandsbeiwert (c_d) ist der einzige Parameter, welcher sich durch die geometrische Anpassung der AD-Wagenfront verändert. Die Leistungsdifferenz ergibt sich aus dem Unterschied der Widerstandsbeiwerte der heutigen Konfiguration gegenüber der Konfiguration mit Spoiler:

$$\Delta P = 1/2 \rho v^2 \cdot A \cdot (c_{d_1} - c_{d_2}) \cdot v$$

Die Energieeinsparung lässt sich aus der Leistungsdifferenz multipliziert mit der Geschwindigkeitsverteilung berechnen. Die Zeitdauer entnehmen wir einer Berechnung der Häufigkeit der gefahrenen Geschwindigkeiten der AD-Wagen aus dem Jahr 2016.

$$\Delta E = \Delta W = 1/2 \rho v^3 \cdot A \cdot (c_{d_1} - c_{d_2}) \cdot t$$

Der Zug hat nicht die gleiche geometrische Querschnittsfläche bei Vorwärts- oder Rückwärtsfahrt. Dem entsprechend ist auch der Widerstandsbeiwert fahrtrichtungsabhängig. Die IC 2000 Züge verkehren in Pendelfahrten, die Kompositionen fahren gleich oft vorwärts wie rückwärts. Die gesamte Energieeinsparung berechnet sich damit wie folgt:

$$\Delta E_{tot} = \Delta E_{vorwärts} + \Delta E_{rückwärts}$$

Die Dauer der Vorwärts- und Rückwärtsfahrt wird in der Einsparungsberechnung berücksichtigt.
