



# ATO Testfahrten für Meter- und Spezialspurbahnen/Trambahnen

## VöV AGr ATO

### Schlussbericht



©RhB

#### Autoren Schlussbericht

<b>Markus Koller</b>	<b>Stadler Signalling AG</b>	Alte Winterthurerstrasse 14B, 8304 Wallisellen
<b>Stefan Blaser</b>	<b>Siemens Mobility AG</b>	Hammerweg 1, 8304 Wallisellen
<b>Pierre-Yves Kalbfuss</b>	<b>Rhätische Bahn AG</b>	RhB-Strasse 1, 7302 Landquart
<b>Fabio Peng</b>	Rhätische Bahn AG	
<b>René Keller</b>	Rhätische Bahn AG	
<b>Rico Zanchetti</b>	Rhätische Bahn AG	
<b>Gerhard Züger</b>	<b>zb Zentralbahn AG</b>	Bahnhofstrasse 23, 6362 Stansstad

#### Version

3.0



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Verkehr BAV**  
Förderprogramm für Innovationen im regionalen Personenverkehr (RPV)

Der Bericht entstand in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe «ATO Meterspur/Tram» des verbands öffentlicher Verkehr (VöV).

### **Verband öffentlicher Verkehr (VöV)**

Dählhölzliweg 12

CH-3000 Bern 6

[www.voev.ch](http://www.voev.ch)

### **Mitglieder der Begleitgruppe VöV**

#### **VöV**

Martin Strobel

#### **Baselland Transport (BLT)**

David Niederhauser

#### **Forchbahn (FB)**

Urs Stucki

#### **Matterhorn Gotthard Bahn (MGB)**

Alfons Noti

#### **Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS)**

MarkusENZler

#### **Transport Publics Neuchâelois (TransN)**

Samuel Nikles

#### **Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ)**

Matthias Schlatter

### **Impressum**

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Förderprogramm für Innovationen im regionalen Personenverkehr (RPV)

CH-3003 Bern

Programmleiter

Christophe Le Borgne, BAV

Projektnummer: BAV-3006 | ARAMIS-50681

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

[www.bav.admin.ch/innovation-rpv](http://www.bav.admin.ch/innovation-rpv)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 31.03.2025

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ATO	Automatic Train Operation Automatischer Zugbetrieb
ATO-TS	ATO Trackside Streckenseitige Komponente des ATO-Systems
ATO-OB	ATO-Onboard Fahrzeugseitiges System
ATO-OBU	ATO On Board Unit Fahrzeugseitige Komponente des ATO-Systems
ATO-DMI	ATO Driver Machine Interface Anzeigegerät auf dem Führerstand. Visualisiert die wichtigsten Informationen der Zugfahrt für das Lokpersonal.
AATS	ATO Adapter für die TCMS-Schnittstelle von Stadler
ATP-Gate	Automatic Train Protection Wandelt die proprietären Daten aus ZSI 127 in das SUBSET-130
ETCS L2	European Train Control System (Teil des ERTMS) ETCS-Level 2 Full Supervision. Führerstandssignalisierung. Kann sowohl aus Systemen mit fixen Signalabschnitten und infrastrukturseitiger Gleisfreimeldung wie auch aus Systemen mit mobilen Signalabschnitten («Moving Block») und ohne infrastrukturseitige Gleisfreimeldung, sowie aus hybriden Systemen, bestehen.
EoA	End of (Movement) Authority (ETCS/ZBMS)
ERTMS	European Rail Traffic Management System Europäisches Eisenbahnverkehrsleitsystem, Umfasst Stellwerk,
FDV	Schweizerische Fahrdienstvorschriften
FFr	Forschungsfrage
FLG	Fahrzeugleitgerät
GoA2	Der Zug fährt automatisch, das Anhalten ist automatisiert, aber ein Lokführer im Führerstand ist erforderlich, um die automatische Fahrt des Zuges zu starten, der Lokführer kann die Türen betätigen (obwohl dies auch automatisch geschehen kann), der Lokführer ist immer noch im Führerstand, um zu prüfen, ob die Strecke frei ist und um andere manuelle Funktionen auszuführen. Der Lokführer kann in Notfällen oder bei Beeinträchtigungen die Führung übernehmen. [001] [012] Referenz CH:
GoA3	Der Zug wird automatisch betrieben, einschließlich der automatischen Abfahrt, ein Zugbegleiter hat einige betriebliche Aufgaben, z. B. die Bedienung der Zugtüren (obwohl dies auch automatisch erfolgen kann), und kann in Notfällen oder bei Störungen die Kontrolle übernehmen. [001]

GoA4	Unbeaufsichtigter Zugbetrieb; alle Funktionen des Zugbetriebs laufen automatisch ab, ohne dass Personal an Bord ist, das in Notfällen oder bei Störungen die Kontrolle übernimmt. [001]
Ittis	Integrales Leit- und Informationssystem von Siemens
NTP	Netzwerkzeitprotokoll
RTE	Regelwerk Technik Eisenbahn
SIL	Safety Integrity Level Sicherheitsanforderungsstufe
SMO	Siemens Mobility AG
STASIG	Stadler Signalling AG
TMS	Traffic Management System Automatisierung der Fahrpläne und Disposition
TCMS	Train Control and Management System Zug Kommunikation- und Steuerungssystem
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität TSI enthalten die Anforderungen und die Prüfverfahren für Interoperabilitätskomponenten und Teilsysteme.
UNISIG	Union Industry of Signalling Union der Industrien der Europäischen Eisenbahnsysteme
ULG	Überwachungsleitgerät
UTC	Koordinierte Weltzeit
VöV	Verband öffentlicher Verkehr
ZBMS	Standard Zugbeeinflussung Meter- und Spezialspurbahnen

## Inhaltsverzeichnis

1.1	Ausgangslage .....	9
1.2	Ziel des Innovationsvorhabens.....	9
1.3	Abgrenzung .....	9
1.4	Projektziele und Forschungsfragen.....	10
1.5	Vorgehensweise .....	10
1.6	Systemarchitektur .....	11
1.7	Testarchitektur .....	12
1.8	Testkonfiguration .....	14
1.9	Integration ATO-OB.....	14
1.10	übergeordnete Funktionsweise .....	14
1.11	Ergebnisse der statischen Tests .....	15
1.12	Ergebnisse der dynamischen Tests .....	15
1.13	Ergänzungen & Diskrepanzen zu den TSI-ATO-Spezifikationen.....	16
1.14	Standardisierung TCMS .....	19
1.15	Referenzzeit .....	19
1.16	nicht-automatisierbare Betriebsprozesse .....	20
1.17	Fahrprofil und Geschwindigkeitsschwellen FDV – ATO.....	20
1.18	weitere relevante fahrdienstliche Erkenntnisse.....	21
1.19	Zulassung und Sicherheitsnachweis .....	21
1.20	technische Umsetzungsfähigkeit ATO GoA2 over ZSI 127 .....	22
1.21	Erreichung der Projektziele .....	22
1.22	notwendige Weiterentwicklung.....	23
1.23	notwendige Umsysteme für die kommerzielle Einführung .....	23

## Executive Summary / Zusammenfassung (Deutsch)

Bei Metrosystemen und Stadtbahnen sind voll- oder teilautomatisierte Bahnsysteme bereits Stand der Technik und seit mehreren Jahren in Betrieb. Im Bereich der europäischen interoperablen Bahnsysteme wurde ATO (Automatic Train Operation) mit teilautomatisiertem Betrieb (GoA2) erstmals in der TSI CCS 2023 (technische Spezifikationen für die Interoperabilität) für die Anwendung mit ETCS (European Train Control System) standardisiert. Durch die standardisierten Schnittstellen sollen die ATO-Systeme unterschiedlicher Hersteller mit den existierenden Zugbeeinflussungs- und Fahrzeugsystemen ohne proprietäre Schnittstellen kompatibel sein.

Um die Anwendung von automatisiertem Bahnbetrieb auf Basis der europäischen TSI-Spezifikationen auch für die Meter-/Spezialspurbahnen und Trambahnen offen zu halten, wurde das Projekt ATO Testfahrten für Meter- und Spezialspurbahnen/Trambahnen ins Leben gerufen. Ziel des Projektes war es, die Schnittstellen zwischen den Systemen gemäss europäischen Standards auf die Einsetzbarkeit bei den Meter- und Spezialspurbahnen zu testen und in einer ersten Version festzulegen.

- die europäischen TSI-Spezifikationen müssen für einen kommerziellen Einsatz von ATO GoA2 auf Basis ZBMS bei den Meterspurbahnen nur geringfügig angepasst werden.
- die Systemarchitektur gem. TSI CCS 2023 kann grundsätzlich auch für kommerzielle Zugfahrten unter ATO GoA2 unter ZBMS bei den Meterspurbahnen verwendet werden. Es bestehen jedoch noch offene Fragen bezüglich betrieblicher Konformität und Sicherheit, deren Untersuchung nicht Bestandteil des Projekts waren.
- Die Offenlegung der Schnittstellen SUBSET-130 und SUBSET-139 hat sich als sehr zweckmässig erwiesen und kann als Basis für die Umsetzung verwendet werden.
- mit beiden ATO-OB (Siemens/Stadler) konnte die betriebliche und technische Funktionsfähigkeit getestet und nachgewiesen werden. Die Durchführung der betrieblichen Prozesse in ATO GoA2 sowie präzisen Anhalten und weitere Prozesse konnten erfolgreich durchgeführt werden.
- Aufgrund der Charakteristik des ZBMS als Hintergrundüberwachung bestehen Diskrepanzen zwischen dem von ZSI überwachten und dem von ATO-OB gem. FDV zu berechnenden Fahrprofil. Diese Diskrepanzen können durch ein Zusammenspiel aus Vorgaben aus ZSI 127 sowie der Projektierung der Streckendaten im Segment-Profile zum Teil behoben werden.

Zusammenfassend zeigen diese Resultate, dass mit Fahrzeugen neuerer Generation (neue Fahrzeugleittechnik) die europäischen Standards übernommen werden können. Das bei den Meterspurbahnen im Einsatz stehende Zugbeeinflussungssystem ZSI127 (nach ZBMS-Standard) verfügt ebenfalls über die nötigen Schnittstellen, so dass eine Standard ATO-Onboard Unit eingesetzt werden kann. Diskrepanzen wurden in der betrieblichen Anwendbarkeit festgestellt. Diese betreffen jedoch weniger die Schnittstellen als vielmehr die ATO-Software.

Die erfolgreich getestete Schnittstellendefinition wird in einer R RTE 48510 festgehalten und über den VöV veröffentlicht und kann daher von allen Meterspurbahnen in der Spezifikation und Beschaffung verwendet werden.

## Executive Summary / Résumé (français)

Pour les systèmes de métro et RER, les systèmes ferroviaires entièrement ou partiellement automatisés font déjà partie de l'état de l'art et sont en service depuis plusieurs années. Dans le domaine des systèmes ferroviaires interopérables européens, l'ATO (Automatic Train Operation) avec fonctionnement partiellement automatisé (GoA2) a été normalisé pour la première fois dans la TSI CCS 2023 (spécification technique d'interopérabilité) pour l'application avec ETCS (European Train Control System). Grâce aux interfaces standardisées, les systèmes ATO de différents fabricants doivent être compatibles avec les systèmes de contrôle des trains et de matériel roulant existants sans interfaces propriétaires.

Afin d'ouvrir l'application de l'exploitation ferroviaire automatisée sur la base des spécifications européennes TSI aux chemins de fer à voie métrique/spéciale et aux tramways, le projet « ATO essais pour les chemins de fer à voie métrique et tramways » a été mis en place. L'objectif du projet était de tester les interfaces correspondantes aux normes européennes entre les systèmes, afin de déterminer la possibilité de leur application auprès des chemins de fer à voie métrique et écartement spécial et de les définir dans une première version.

- Les spécifications européennes TSI ne doivent être que légèrement adaptées pour une utilisation commerciale de ATO GoA2 sur la base de ZBMS pour les chemins de fer à voie métrique.
- L'architecture du système selon la TSI CCS 2023 peut en principe également être utilisée pour la circulation commerciale des trains sous ATO GoA2 avec ZBMS pour les chemins de fer à voie métrique. Cependant, il reste des questions ouvertes concernant la conformité opérationnelle et la sécurité, dont l'examen ne faisait pas partie du projet.
- La publication des interfaces SUBSET-130 et SUBSET-139 s'est avérée très utile et peut être utilisée comme base pour la mise en œuvre.
- La fonctionnalité opérationnelle et technique des deux ATO-OB (Siemens/Stadler) a pu être testée et prouvée. L'exécution des processus opérationnels dans l'ATO GoA2 ainsi que les arrêts précis et d'autres processus ont pu être réalisés avec succès.
- En raison de la caractéristique du ZBMS en tant que système de surveillance, il existe des divergences entre le profil de conduite surveillé par le ZSI et celui à calculer par l'ATO-OB conformément à l'OST. Ces divergences peuvent être en partie éliminées grâce à l'interaction entre les données de ZSI 127 et la projection des données de parcours dans les profils de segment.

En résumé, ces résultats montrent qu'il était possible d'adopter les normes européennes avec des véhicules de nouvelle génération (électronique de commande moderne). Le système de contrôle de la marche des trains ZSI127 (selon le standard ZBMS) des chemins de fer à voie métrique dispose également des interfaces nécessaires, de sorte qu'une unité embarquée ATO standardisée peut être utilisée. Des divergences ont été constatées dans l'applicabilité en exploitation. Toutefois, ce point concerne moins les interfaces que le logiciel ATO.

La définition des interfaces testée avec succès sera consignée dans une R RTE 48510 et publiée par l'Union des Transports Publics. Elle peut donc être utilisée par tous les chemins de fer à voie métrique dans la spécification et l'acquisition.

## Executive Summary (English)

Metro and suburban rail using fully, or partially automated railway operation systems are already state of the art and have been in operation for several years. In the area of European interoperable rail systems, ATO with partially automated operation (GoA2) was standardised for the first time in the TSI CCS 2023 (Technical Specifications for Interoperability) for use with ETCS (European Train Control System). The standardised interfaces are intended to make ATO systems from different manufacturers compatible with existing train control and vehicle systems without proprietary interfaces.

To keep the application of automated rail operations based on the European TSI specifications open for meter gauge/special gauge railways and tramways, the ATO test runs for meter gauge and special gauge railways/tramways project was launched. The goal of the project was to test the interfaces between the systems in accordance with European standards for usability on meter and special gauge railroads and to define them in an initial version.

- The European TSI specifications need only minor adjustments for the commercial use of ATO GoA2 based on ZBMS for meter-gauge railways.
- The system architecture according to the TSI CCS 2023 can basically also be used for commercial train operations under ATO GoA2 with ZBMS for meter-gauge railways. - However, there are still open questions regarding operational conformity and safety, whose investigation was not part of the project.
- The publication of the SUBSET-130 and SUBSET-139 interfaces has proven very useful and can serve as a basis for implementation.
- The operational and technical functionality of both ATO-OBs (Siemens/Stadler) was tested and proven. Operational processes in ATO GoA2, as well as precise stops and other procedures, were successfully executed.
- Due to ZBMS's nature as a monitoring system, there are discrepancies between the driving profile monitored by ZSI and the driving profile to be calculated by ATO-OB in accordance with Swiss Railway Operating Regulations (FDV). These discrepancies can be partially resolved through the interaction of specifications from ZSI 127 and the projection of route data into segment profiles.

Summarized, test runs have shown that the European standards can be adopted with the latest generation of vehicles (new vehicle control technology). The ZSI127 train control system (according to the ZBMS standard) used by the meter-gauge railways also has the necessary interfaces so that a standard ATO onboard unit can be used. Discrepancies were found in the operational applicability. However, this has less to do with the interfaces than with the ATO software.

The successfully tested interface definition is recorded in an R RTE 48510 and published via the VöV and can therefore be used by all meter-gauge railways in specification and procurement.

# Einführung

## 1.1 Ausgangslage

In geschlossenen Metro- und S-Bahnsystemen sind Anwendungen von automatisiertem Bahnbetrieb (Automatic Train Operation, ATO) unterschiedlicher Automatisierungslevel (GoA0 – GoA4) bereits in Betrieb. Im interoperablen Normalspurbereich sind zum Stand heute unterschiedliche Innovationsvorhaben und Standardisierungsinitiativen im Gange. Mit der TSI CCS 2023 wurde halbautomatischer Bahnbetrieb unter ETCS erstmalig standardisiert.

Der Nutzen von Anwendungsfällen des automatisierten Bahnbetriebs variiert je nach Ausgangslage gemäss Produktionskonzept und dem anzuwendenden Automatisierungslevel. Mögliche Effekte sind die Optimierung stark belasteter Bahnstrecken und Knoten in Kombination mit einem Traffic Management System (TMS), durch direkten und beliebig aktualisierbaren Zugriff auf den SOLL-Fahrplan des Zuges. Weitere mögliche Effekte sind Kapazitäts- oder Betriebsqualitätsverbesserungen durch geringere Fahrvarianz oder Energieeinsparung durch optimalere Fahrweise. Durch den Einsatz vollautomatischer Bahnsysteme können zudem die Produktionskosten von einzelnen Nebenlinien bei gleichbleibender oder höherer Frequenz optimiert werden.

Um diesen Thematiken zu begegnen, verfolgt die VöV Arbeitsgruppe ATO Meter-/Spezialspurbahnen und Trambahnen das Ziel, auf Basis des TSI-Standards einen ATO-Standard für die diese Bahnen zu entwickeln und den Bahnen im Rahmen der R RTE 48510 «Assistenzsysteme/Automatisierung (ATO), Meter- und Spezialspur» zur Verfügung zu stellen. Dieser Standard basiert auf ZBMS und bildet das Level GoA2 ab. Die Level GoA3 und GoA4 sollen im Sinne einer späteren Migrationsfähigkeit berücksichtigt werden.

## 1.2 Ziel des Innovationsvorhabens

Ziel des Projektes «ATO Testfahrten für Meter-/Spezialspurbahnen und Trambahnen» ist es, offene Standardschnittstellen und Spezifikationen für die Einführung von ATO inkl. Schnittstellen zu Zugsicherung und Fahrzeugleittechnik zu schaffen. Mit dem Projekt soll damit eine technische Grundlage für die Ausrüstung der Fahrzeuge mit ATO geschaffen und validiert werden. Um die korrekte Funktionsweise der für den ZBMS-Standard definierten Schnittstellen nachzuweisen, werden GoA2 Testfahrten auf der Strecke Landquart – Küblis durchgeführt. Während der Testfahrten kann der Lokführer durch eine Bedienhandlung für einen definierten Streckenabschnitt (normalerweise bis zum nächsten Halt) die Kontrolle über die Fahrzeugsteuerung (Beschleunigung und Verzögerung) der ATO-OB übertragen. Die Übernahme der Kontrolle durch den Lokführer ist jederzeit möglich. Das automatische Fahren ist nur im ZSI 127 Mode 'Full Supervision' (FS) möglich. Während den ATO-Testfahrten wird der Zug weiterhin durch ZSI 127 überwacht (Überwachung der Warn- und Betriebsbrems- und Zwangsbremskurve). Da es sich bei ZSI 127 nur um eine Hintergrundüberwachung (SIL0) handelt, trägt der Lokführer auch während der Fahrt mit ATO die volle Sicherheitsverantwortung und muss bei Bedarf die Kontrolle übernehmen. Dazu ist anzumerken, dass die von der AB-EBV zur Definition der GoA-Stufen referenzierte SN EN 62267:2009 «*Bahnanwendungen - Automatischer städtischer schienengebundener Personenahverkehr (AUGT) – Sicherheitsanforderungen*» die Sicherheitsverantwortung auf das technische System überträgt. Im vorliegenden Projekt steht das Testen der Schnittstellen gemäss TSI-Subsets im Fokus. Deshalb wird die den TSI entsprechende Definition des ATO-Systems als Set von non-safety-functions übernommen (Sicherheitsverantwortung liegt beim Zugsicherungssystem und beim Personal, welches überwacht).

Nach Abschluss der Tests können die Fahrzeuge mit einer offenen Standardschnittstelle ausgerüstet werden, die es ermöglicht, ATO-Rechner eines beliebigen Herstellers einzusetzen.

## 1.3 Abgrenzung

Der vorliegende Bericht stellt ausschliesslich die Vorgehensweise, Erkenntnisse und Empfehlungen zum Kern des BAV-finanzierten Innovationsprojektes «VöV ATO Schnittstellen» in den Vordergrund. Weitere im Rahmen der Tests gewonnene Erkenntnisse, besonders in Bezug auf Betrieb, Human Factors und Weiterentwicklung fliessen in den Abschlussbericht der VöV ArG ATO ein und werden in diesem Bericht nur abschnittsweise referenziert.

## Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

### 1.4 Projektziele und Forschungsfragen

Mit dem Projekt «ATO Testfahrten für Meter-/Spezialspurbahnen und Trambahnen» sollen die folgenden Fragestellungen untersucht und verifiziert werden:

*Tabelle 1 - Fragenkatalog und Projektziele*

- [FFr1]** Welche Voraussetzungen müssen gegeben sein, damit herstellerunabhängige ATO-OBU eingesetzt werden können (Offenlegung der Schnittstellen/Protokoll)?
- [FFr2]** Sind Anpassungen der TSI Schnittstellendefinition notwendig, damit die Bedürfnisse der Meter- und Spezialspurbahnen/Trambahnen abgedeckt werden können?
- [FFr3]** Falls Anpassungen notwendig werden, stellen sich die Fragen nach
  - Art und Ausprägung der Schnittstellen
  - Funktionalitäten der ATO-OBU
- [FFr4]** Inwiefern können Investitionskosten mittels standardisierter Schnittstellen eingespart werden und gleichzeitig die Innovation gefördert werden?

### 1.5 Vorgehensweise

Um allfällige Abweichungen zu den TSI-ATO-Spezifikationen, die generelle Funktionsweise der Schnittstellen sowie die Funktionsweise von ATO inkl. Umsystemen für die Meter-/Spezialspurbahnen zu untersuchen, wurde die nachfolgende Vorgehensweise gewählt:

*Tabelle 2 - Vorgehensweise und Zeitplan*

<b>07/2022 – 08/2022</b>	Projektstart und Definition der zu verwendenden Versionen der Spezifikationen
<b>09/2022 – 11/2022</b>	Implementation/Anpassung der Schnittstellen (SUBSET-130 und SUBSET-139)
<b>12/2022 – 01/2023</b>	Aufbau der Hardware für die ATO-OB inkl. ATO-DMI und Aufsetzen der ATO-TS inkl. Erstellen der Streckendaten
<b>02/2023 – 03/2023</b>	Integration und Tests im Labor
<b>04/2023 – 05/2023</b>	Statische Tests zur Integration ATO-OB in das Fahrzeug ABe 4/16
<b>05/2023 – 06/2023</b>	Auswertung der statischen Tests, Erstellung des Zwischenberichts
<b>06/2023 – 10/2023</b>	Dynamische Testfahrten zwischen Landquart – Küblis Zum Test der offenen Schnittstellen wurde im «plug- & play»-Ansatz abwechselnd mit einer ATO-OBU von Stadler oder Siemens getestet.
<b>11/2023 – 07/2024</b>	Auswertung der Ergebnisse, Erstellung des Abschlussberichts
<b>Ab 08/2024</b>	Einfluss der Ergebnisse in die R RTE 48510

## 1.6 Systemarchitektur

In den letzten Jahren wurde ATO GoA2 für ERTMS von der UNISIG standardisiert. Dieser Standard ist Teil der TSI CCS 2023. Auf Basis des TSI-Standards soll im Rahmen der R RTE 48510 für ZBMS ein Standard für ATO-Lösungen bei den Meter- und Spezialpurbahnen definiert werden.

Damit in einem beliebigen Fahrzeug eine ATO-OB eines beliebigen Herstellers eingesetzt werden kann, definiert der TSI-Standard die Schnittstellen der ATO-OB zum Fahrzeug (SUBSET-139), zur Zugbeeinflussung (SUBSET-130) und zur ATO-TS (SUBSET-126). Die Anforderungen an das ATO-System sind im SUBSET-125 definiert. Die ATO-TS liefert die Fahrvorgaben (Journey Profiles) und die Streckendaten (Segment Profiles) an die ATO-OB. Der Nutzen von ATO hängt massgeblich von der Qualität der Zeitvorgaben in den Journey Profiles ab. Im Endausbau werden die optimierten Zeitvorgaben unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrslage vom TMS berechnet und an die ATO-TS geliefert. Für die Schnittstellentests im aktuellen Projekt wurden die Journey Profiles und somit auch die Zeitvorgaben über einen Journey Profile Editor manuell erstellt und in die ATO-TS geladen.

Die standardisierte Systemarchitektur aus den TSI-Standards wird in diesem Projekt auf die Meter- und Spezialpurbahnen adaptiert. Dies betrifft die Schnittstelle zur Zugsicherung (ZSI 127) und der Fahrzeugleittechnik (TCMS) via AATS-Box (ATO-Adapter TCMS). Die angepasste Systemarchitektur mit den adaptierten Schnittstellen SUBSET-130M und SUBSET-139M ist in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich.

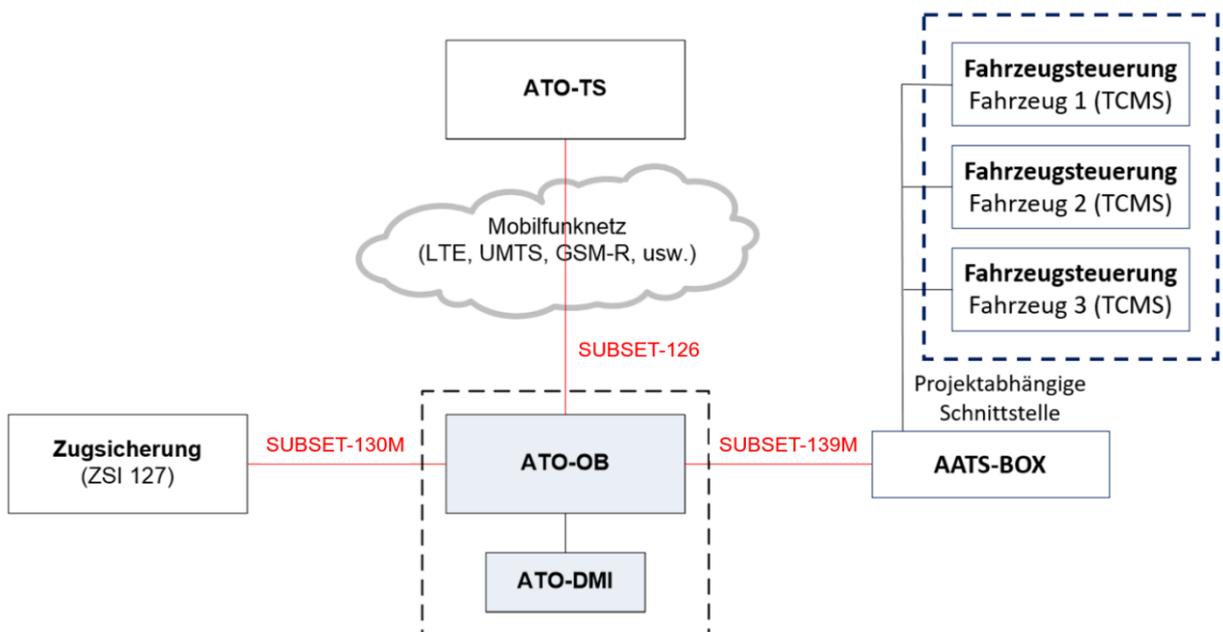


Abbildung 1 - Ziel-Systemarchitektur nach R RTE 48510

## 1.7 Testarchitektur

Die umgesetzte Systemarchitektur der Testfahrten basiert auf der im vorangegangenen Kapitel dargestellten Adaption auf Basis des europäischen Standards. Für die Definition der spezifischen Schnittstellen SUBSET-130M und SUBSET-139M sowie der weiteren Spezifikationen wurden folgende Versionen verwendet:

Tabelle 3 - verwendete TSI-ATO-Spezifikationen

<b>SUBSET-125</b>	V0.1.0	Entwurf vom 04.05.2018
<b>SUBSET-126</b>	V0.0.16	Entwurf vom 07.05.2018
<b>SUBSET-130</b>	V0.1.0 W03	Entwurf vom 05.11.2018
<b>SUBSET-139</b>	V0.0.19	Entwurf vom 30.07.2021
<b>SUBSET-143</b>	V0.0.10	Entwurf vom 27.08.2021

Zum Start des Projektes lagen die ATO-Spezifikationen nur als Entwurf vor. Die jeweilige Entwurfsversion wurde daher für die Laufzeit des Projektes eingefroren.

Zudem wurden die Spezifikationen für die Testfahrten nicht bereits für die Anwendung bei den Meterspur-/Spezialspurbahnen modifiziert oder erweitert. Im Rahmen der Veröffentlichung der R RTE 48510 sollen die Spezifikationsentwürfe für SUBSET-130 (ATO-ZBMS) und SUBSET-139 (ATO-TCMS) modifiziert als SUBSET-xxxM ('M' = Meterspurbahnen) veröffentlicht werden. Dabei kann es sich beispielsweise um Erweiterungen für zusätzliche Funktionen oder wegen Abweichungen von ZSI 127 zu ETCS handeln.

Die Implementierung des ATO-Systems nach den definierten Standards erfolgte in ein Fahrzeug des Typs ABe 4/16, Serie 3111-3166 der RhB vom Hersteller Stadler. Für die Tests wurden abwechselnd ATO-OBs der Hersteller Siemens und Stadler temporär eingebaut und nach den Testfahrten wieder entfernt. Die genaue Umsetzung und Verkabelung folgte dabei dem in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Testaufbau.

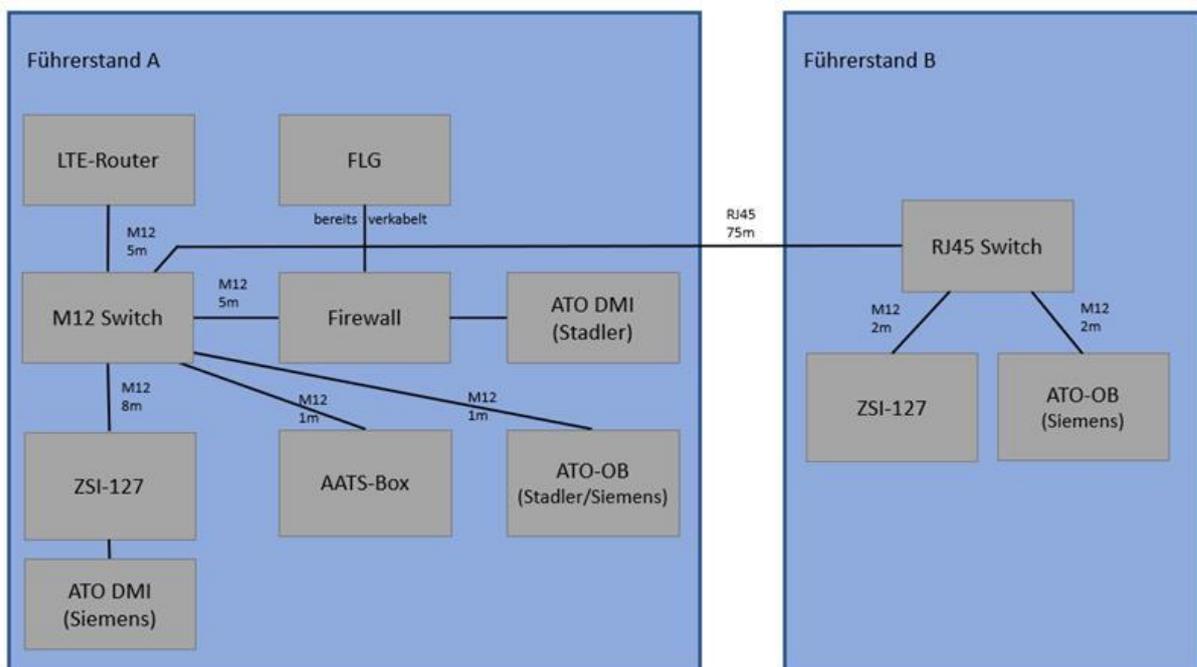


Abbildung 2 - Netzwerkarchitektur und Verkabelung ATO-Ausrüstung Testfahrzeug ABe 4/16

Die Schnittstelle zwischen ZSI 127 und den ATO-OBs ist via ATP-Gate seitens Siemens realisiert und stellt damit die Daten der Zugbeeinflussung gem. SUBSET-130 zur Verfügung. Die Schnittstelle zum TCMS des Testfahrzeuges erfolgte gemäss SUBSET-139 anhand der AATS-Box seitens Stadler. Journey- und Segment-Profiles wurde in einer ATO-TS-Umgebung von Siemens generiert und via Mobilfunk an das Fahrzeug gesendet (LTE-Router). Der Testaufbau ist so gestaltet, dass wahlweise die ATO-OB

von Siemens oder Stadler aktiviert werden kann. Auf Basis der standardisierten Schnittstellen können beide ATO-OBs getestet und damit eine herstellerunabhängige Implementation getestet werden. Die Informationen werden dabei über einen Switch verteilt (M12-Switch). Die Abbildung zur Testarchitektur enthält informativ die Länge der Verkabelung.

Folgende abweichende Umsetzungen bestanden zwischen Siemens und Stadler:

- |                |  |
|----------------|--|
| <b>Stadler</b> | Durch die Verbindung über das Ethernet-Netzwerk (TCMS) des ABe 4/16 benötigt Stadler in der getesteten Architektur für Bewegungen in beide Fahrrichtungen nur eine ATO-OB. Das ATO-DMI wurde auf dem bestehenden Diagnose-DMI über eine Softwareanpassung realisiert.                      |
| <b>Siemens</b> | In der Testarchitektur wird je Fahrrichtung eine separate ATO-OB benötigt. Die Bedienung und Anzeige erfolgt dem TSI-Standard entsprechend über das SUB-SET-130. Dazu wurde dem Testlokfürer ein Tablet zur Verfügung gestellt. Das Tablet ist über ein ATP-Gate mit der ATO-OB verbunden. |

## Erkenntnisse des Forschungsprojekts

### 1.8 Testkonfiguration

Für die ATO-Testfahrten wurde folgende SW-Konfiguration benutzt:

*Tabelle 4 - SW-Konfiguration ATO/ZSI/Fzg*

SW ZSI 127	Feldtest_ATO_Poc_RhB_v1 (Basis ist Rel. 05.04.0002 mit Anpassungen für ATO)
SW-Gate ZSI 127	rhb-v0.2.4
ATO-OBUSMO	AoE0.8-aoe-lab-i20-v16
ATO-OBUSSTASIG	ATO SW Version 0.1.0.0
SW-Gate TCMS	AATS SW Version 0.1.0.0
SW-TCMS	1.0.0.1
SW-HMI PIXY	1.0.1
SW-ATO-TS	ATO-TS-REL-0.6_ENV-S2L2-REL-0.6
SW-Firewall	1.1.0
SW RCU	1.3.0

### 1.9 Integration ATO-OB

Zur Integration der ATO-OB in das Fahrzeug ABe 4/16 werden folgende Erkenntnisse festgehalten:

- Stadler** Da für die ATO-OBU notwendige Versorgungsspannung, sowie die Netzwerk Verkabelung bereits auf dem Fahrzeug installiert ist, ist deren Einbau mit geringem Umbauaufwand möglich.  
Falls eine Stadler ATO-OBU verwendet wird, kann auf eine separate AATS-Box verzichtet werden, da diese als Software auf der ATO-OBU realisiert werden kann (ATO OBU Abmessungen: 297x138x55 mm).
- Siemens** Die Platzverhältnisse beim permanenten Einbau einer Siemens ATO-OB sind noch zu klären. Eine mögliche Lösung ist, dass das ATP-Gate in die bestehende ZSI 127 integriert wird.

### 1.10 übergeordnete Funktionsweise

Bei den ATO-Testfahrten konnte die korrekte Funktion der entwickelten Schnittstellen dynamisch nachgewiesen werden. Die Funktionen der Schnittstellen gemäss SUBSET-139 (durch AATS-Box realisiert) und SUBSET-130 (durch ATP-Gate realisiert) wurde mit der ATO-OB von Stadler, sowie der ATO-OB von Siemens Mobility nachgewiesen.

### 1.11 Ergebnisse der statischen Tests

Zu den Ergebnissen der ersten Tests (statische Tests) kann folgendes festgehalten werden:

**Stadler      Dokumentation**

[006] Testprotokoll statische Tests Stadler

**Ergebnis**

Die statischen Tests in Felsberg wurden erfolgreich durchgeführt und die festgestellten Mängel konnten im Anschluss behoben werden.

**Siemens      Dokumentation**

[007] [008] Testprotokolle statische Tests Siemens Fst A/B

**Ergebnis**

Die statischen Tests wurden erfolgreich durchgeführt und die festgestellten Mängel konnten im Anschluss behoben werden.

### 1.12 Ergebnisse der dynamischen Tests

Zu den Ergebnissen der dynamischen Tests kann folgendes festgehalten werden:

**Stadler      Dokumentation**

[009] Testprotokoll dynamische Tests Stadler

**Ergebnis**

- Erfolgreiche Tests aller Schnittstellensignale bei dynamischen Fahrten
- Erfolgreiche Überprüfung der TCMS Funktionalität im Zusammenhang mit ATO Fahrbefehlen
- Durchgängige Funktionalität / Austausch der Signale ZSI – ATO OB – TMS - AATS – TCMS nachgewiesen
- Erfolgreiche Fahrten mit dem ATO GoA2 von Stadler

Die Stadler ATO-OB wurde gemäss Inhalt des Projektes nur im begrenzten Funktionsumfang implementiert. Dabei konnten die wesentlichen Funktionen für die Fahrt unter ATO GoA2 nachgewiesen werden. Dies inkludiert Funktionalitäten wie die automatische Weiterfahrt nach Signalhalt sowie eine Haltegenauigkeit von +/- 2m zur Zielposition gem. Ausgangsdaten bei halbautomatischer Fahrt.

Die Bedienung erfolgt abweichend zu den TSI-Subsets auf dem Diagnosedisplay des Testfahrzeuges. Das in der ATO-OB verwendete Bremsmodell musste vereinfacht implementiert werden (Angaben gem. SUBSET-139: N\_BRAKE\_SAFE\_ITER = 0, und konstante A\_BRAKE\_SAFE). Die Bremskraft ist geschwindigkeitsabhängig und wird von der Stadler ATO-OB berücksichtigt. Bei Diskrepanzen zwischen der von ATO-OB und ZSI berechneten Bremskurve kam es zu unerwarteten Bremseinsätzen des Fahrzeuges.

**Siemens      Dokumentation**

[010] [011] Testprotokolle dynamische Tests Siemens Fst A/B

**Ergebnis**

Mit der ATO-OB von Siemens konnte gezeigt werden, dass die entwickelten Schnittstellen bereits ohne weitere Optimierungsmassnahmen (wie z.B. zusätzliche Balisen) präzises automatisches Fahren mit einer Haltegenauigkeit von ca. ± 2 Meter und einer Einhaltung der Zeitvorgaben im Sekundenbereich ermöglichen. Dabei wurden die unterschiedlichen Test-Szenarien wie 'Alle Signale auf Fahrt', 'Halt-zeigende Signale', 'Auslassen von betrieblichen Halten', 'Fahrten mit und ohne Zeitreserven' usw. erfolgreich getestet. Es konnte auch gezeigt werden, dass ZSI 127 grundsätzlich automatisches Fahren gemäss TSI Standard ermöglicht, auch wenn es noch kleinere Abweichungen und Unregelmässigkeiten gibt, z.B. aufgrund abweichender Bremskurven zwischen ZSI 127 und ATO-OB. Ein ungelöster Punkt ist, dass sich die signalisierte Geschwindigkeit

und die von ZSI 127 überwachte Geschwindigkeit teilweise unterscheiden und dass die ATO-OB nur die überwachte Geschwindigkeit kennt und somit diese als Vorgabe verwendet.

### 1.13 Ergänzungen & Diskrepanzen zu den TSI-ATO-Spezifikationen

Ein Ziel der Testkampagne war die Evaluation der für die Meter- und Spezialspurbahnen notwendigen Ergänzungen sowie Anpassungen der Spezifikationen der TSI für ATO over ETCS.

Anzumerken ist, dass in der TSI ATO erst ab ETCS L2 und nicht mit ETCS L1 LS vorgesehen ist. Unter anderem, weil nur ETCS L2 eine kontinuierliche Datenübertragung vorsieht und ETCS L1 LS nur über Basic Integrity (SIL 0) verfügt. ZBMS deckt dieselben Grundfunktionen wie ETCS L1 LS ab und verfügt über einige weiterführende Funktionalitäten (z.B. verlinkte Balisen), kann jedoch funktional nicht mit ETCS L2 gleichgestellt werden und verfügt ebenfalls nur über Basic Integrity.

Die nachfolgend dargestellten Erkenntnisse beziehen sich auf die ausgewiesenen verwendeten Versionen der Spezifikationen. Weitere Änderungen durch die Änderung der verwendeten Versionen im Vergleich zu den veröffentlichten Versionen V1.0.0 der Spezifikationen in der TSI CCS sind z.T. ebenfalls berücksichtigt. Diese Analyse ist jedoch nicht vollständig abgeschlossen.

*Tabelle 5 - Ergänzungen und Diskrepanzen zu den TSI-ATO-Spezifikationen*

- |                   |   |
|-------------------|---|
| <b>SUBSET-125</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Die Funktionsweise von ATO over ETCS sieht durch den Betriebsmodus «Full Supervision» eine automatische Weiterfahrt eines Zuges nach einem Signalhalt nach Aufschalten eines Signals vor.<br/>Bei ZBMS ist diese Funktionalität nur gewährleistet, wenn der Zug sich auf einem Loop befindet. Nur so kann die Aufschaltung des Fahrbegriffs an ATO über ZSI übertragen werden.<br/>Ohne Loop ist eine manuelle Weiterfahrt des Lokführers bis zur nächsten Balisengruppe (und damit Erweiterung der EoA) notwendig. Anschliessend kann ATO wieder aktiviert werden.</li><li>- Für die Aktivierung von ATO ist seitens ETCS ein Betriebsmodus «Automated Driving AD» vorgesehen. Dieser ist in ZSI 127 nicht vorhanden. Die Konditionen für die Aktivierung von ATO weichen daher ab.</li><li>- Die Darstellung der relevanten ATO-Informationen auf dem ETCS-DMI ist bei ZSI 127 im aktuellen Stand nicht möglich (kein entsprechendes DMI). Bis zur Einführung eines erweiterten ZSI-DMI muss das ATO-DMI daher herstellerabhängig unter Nutzung des SUBSET-130 oder unter Erweiterung des SUBSET-139 auf den bestehenden DMIs des Fahrzeugs umgesetzt werden.</li></ul> |
| <b>SUBSET-130</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Die ATO-Schnittstelle zu ZSI 127 ist so implementiert, dass beim automatischen Fahren durch ATO die Überwachung der Warn- und Betriebsbremskurve ausgeschaltet wird (analog AD-Mode ETCS).<br/>Die Implementierung dieses Modus analog SUBSET-130 wurde in diesem Projekt ausgeschlossen (ATO-OB fragt den Modus «AD» nicht bei ZSI 127 über SUBSET-130 an). Grund hierfür ist die aus Sicht des Projekts kritisch zu beurteilende Abschaltung der Warn- und Betriebsbremskurve bei einem als Hintergrundüberwachung konzipiertem Zugbeeinflussungssystem bei Überwachung von ATO durch den Lokführer.</li><li>- Die Bremskurven zwischen ETCS und ZSI 127 unterscheiden sich. Die Berechnung des Fahrprofils in ATO-OB entspricht daher dem ETCS-Bremsmodell und den ETCS-Zugkategorien. Da das ETCS-Bremsmodell ggü. ZSI mehr Reserven enthält müssen die Bremskurven an ZSI angepasst werden.<br/>Ein Beispiel für dieses Verhalten ist die Einleitung des Bremsvorgangs bereits vor der Überfahrt der Balisen eines Halt-ankündigenden Vorsignals.</li></ul>  |



Abbildung 3 - erwartete Bremskurve ATO vor Vorsignal

Erhält der Zug am Vorsignal die Information über ein Fahrt-zeigendes Hauptsignal, so wird der Bremsvorgang analog Abb. 3 abgebrochen und die Sollgeschwindigkeit angepasst.

- Aufgrund der Charakteristik des ZSI 127 als Hintergrundüberwachung, wird das Ende der Fahrerlaubnis (EoA) oftmals hinter dem Signal auf den Gefahrenpunkt projiziert. Dies hat zur Folge, dass ATO ohne Eingriff des ZSI über das geschlossene Signal zum EoA-Zielpunkt fahren würde.  
Um dies zu verhindern, muss die Offset-Distanz  $D_{EoA\_Offset}$  genügend gross gewählt werden. In den Testfahrten wurde ein Offset von 35m festgelegt<sup>1</sup>.
- folgende Variablen sind in ZSI 127 nicht vorgesehen und können daher entgegen dem auf ETCS ausgelegten Standard nicht über SUBSET-130 vom ZSI zur Verfügung gestellt werden:
  - $M_{ADHESION\_DRIVER}$
  - $A_{MAXREDADH}$
  - $Q_{CONFIDENCE\_INTERVAL}$ <sup>2</sup>
  - $V_{DELTA0}$
  - $N_{BRAKE\_SAFE\_ITER}$

Das Bremsmodell von ZSI 127 geht deshalb von einer konstanten Verzögerung über den gesamten Geschwindigkeitsbereich aus.

- Bei der Projektierung vom ZBMS wurde die Variabel  $T_{TRACTION}$  auf null gesetzt und daher wird auch im SUBSET-130 null empfangen. Sofortige Traktionsabschaltung wird angenommen ( $T_{TRACTION} = 0$ ). Der Zug kann während dieser Zeit noch beschleunigen (delta  $v_2$  nach SUBSET-026).
- Die Berechnung der Bremskraft analog SUBSET-139 basiert auf einem linearen Bremsverhalten des Fahrzeugs [SUBSET-139, V1.0.0, 6.3.1.6].

## SUBSET-139

### Siemens

Auf der Schnittstelle von der ATO-OB zum Fahrzeug wurden bei der Kommandierung der Bremse als Work-around zusätzliche Korrekturen eingebaut, da das Bremsverhalten des Testzuges nicht wie im SUBSET-139 gefordert linear ist.

<sup>1</sup> Anmerkung aus Konsultation nach den Testfahrten: Die Einstellung des Offsets ist mittels des Segment-Profiles (SUBSET-126) auch pro Segment möglich und kann daher je Streckenabschnitt erfolgen. Der Offset-Wert kann damit so gewählt werden, dass der Abstand zum Hauptsignal ortsunabhängig gleich bleibt und der Lokführer ATO durch ein gleichmässiges Systemverhalten besser überwachen kann.

<sup>2</sup> in der veröffentlichten Version V1.0.0 des SUBSET-130 ist diese Variable nicht mehr enthalten.

- Zusätzlich zum linearen Verhalten des Fahrzeuges ist die Bremskraft durch die geschwindigkeitsabhängige maximale Bremskraft limitiert [SUBSET-139, V1.0.0, 6.3.1.6].

**Siemens** Weil die Vorstillstandsbremse des Testzuges nicht reicht, um den Zug vor einem Halt zeigenden Signal im Gefälle zum Stillstand zu bringen (Zug rollt weiter), kommandiert die ATO-OB im Stillstand als Workaround zusätzliches Bremsen über 50% (-> zusätzliche EP-Bremse). Diese Feststellung wurde gemacht, wenn ATO einen Halt vor dem Halt zeigendem Ausfahrtsignal B22 in Küblis oder vor dem Blocksignal M zwischen Küblis und Fideris ansteuerte. Beide Signale liegen im Gefälle 33-35 ‰.

Dabei handelt es sich um ein bekanntes und gewolltes Verhalten des Triebzuges ABe 4/16 (Serie 3111-3166):

#### 7.4.2 Fahrzeug anhalten

Die Fahrzeugsteuerung berechnet anhand des Fahrzeuggewichtes und der Beschleunigung bzw. der Zugkraft die aktuelle Streckenneigung. Beim Anhalten wird die ED-Bremskraft technisch bedingt bis kurz vor dem Stillstand gänzlich abgebaut.

Vor dem Stillstand steuert die Logik „Vorstillstandsbremse“ die EP-Bremsen aller Achsen mit einem neigungsabhängigen Druck an (Erregen der EP-Ventile und Einleiten einer homogenen Bremsung). Erst im Stillstand wird der maximale Bremszylinderdruck durch die Logik „Stillhaltebremse“ ausgegeben.

- Fahrzeug bzw. Zug befindet sich nicht im Stillstand.
- Fahrrichtungsschalter [140] befindet sich nicht in Stellung „0“
- 1. Z/B-Hebel (Zug-/Bremskraft-Hebel) [150] nach hinten kippen
- 2. Haltpunkt anvisieren und Z/B-Hebel in Position halten
- ✓ Die Vorstillstandsbremse wird bei <6.5km/h aktiviert
- 3. Z/B-Hebel weiter in Position halten
  - a. Bei kleiner Streckenneigung kann sich der Z/B-Hebel im Bereich 0 - -50% befinden (ED-Bremse)
  - b. Bei grosser Streckenneigung muss der Z/B-Hebel über die Rastrierung bei -50% nach hinten gekippt werden (ED + EP-Bremse)
- ✓ Die Stillhaltebremse wird bei <0.1km/h aktiviert

### 1.14 Standardisierung TCMS

Hinsichtlich der standardisierten Schnittstelle SUBSET-139 ATO-TCMS und dem Standardisierungsgrad des TCMS auf den einzelnen Meterspurfahrzeugen kann folgendes festgehalten werden:

- Stadler** Die entsprechenden TCMS-Lösungen der Stadler Meterspurfahrzeuge sind ähnlich. Die in diesem Projekt implementierte AATS-Box (ATO-Adapter zur TCMS-Schnittstelle) stellt die Schnittstelle gemäss SUBSET-139 zur Verfügung, welche dem TSI Standard entspricht. In andere Stadler Fahrzeuge kann diese teilweise übernommen werden und muss nicht von Grund auf neu entwickelt werden.
- Siemens** Das Ziel der standardisierten Schnittstellen ist, dass in einem beliebigen Fahrzeug eine beliebige ATO-OBU, welche dem TSI Standard entspricht, eingesetzt werden kann. Daher kann auch die Siemens ATO-OBU in einem beliebigen Fahrzeug eingesetzt werden, wenn diese eine Schnittstelle gemäss SUBSET-139 zur Verfügung stellt.

### 1.15 Referenzzeit

Die für die Testkampagne verwendeten Entwurfsstände der TSI-ATO-Spezifikationen definieren nicht die Quelle der Referenzzeit, weswegen eine herstellerabhängige Umsetzung gewählt wurde.

Die veröffentlichten TSI-ATO-Spezifikationen in der TSI CCS 2023 definieren im SUBSET-147 die die Quelle der Referenzzeit als 'Train Time and Location Service' (TTLS). Darüber wird die Referenzzeit in UTC über NTP zur Verfügung gestellt.

Zur Umsetzung in den ATO VöV-Testfahrten kann folgendes festgehalten werden:

- Stadler** Aktuell verwendet die Stadler ATO-OB die UTC-Zeit, die sie von einem NTP-Server aus dem Internet bezieht. Eine Anbindung an den Zeitserver des Bahnbetreibers ist einfach umzusetzen und muss bei einer konkreten Umsetzung definiert werden.
- Siemens** Ist keine andere Zeitquelle vorhanden, synchronisiert sich die Siemens ATO-OB mit den Zeiten in den Meldungen der ATO-TS (SUBSET-126). Dies kam im aktuellen Projekt zum Einsatz. Die Zeitsynchronisierung ist in diesem Fall etwas weniger genau, genügt aber für dieses Projekt. Ist auf dem Zug ein NTP-Server vorhanden, kann die ATO-OB die Referenzzeit von diesem beziehen.

## Erkenntnisse ausserhalb der Projektziele

### 1.16 nicht-automatisierbare Betriebsprozesse

Die eingesetzten ATO-Systeme erlauben die Fahrt unter ATO GoA2 im Modus FS von ZSI 127. Mit der vorliegenden standardisierten Architektur können jedoch nicht alle Betriebsprozesse mit ATO GoA2 automatisiert werden. Insbesondere folgende Prozesse verbleiben manuell und vollständig beim Lokführer:

- Türöffnung und Türschliessung (inkl. Abfertigungsvorgang): der ABe 4/16 erlaubt momentan keine SIL-klassifizierte und sichere Möglichkeit, die Türschliessung zu automatisieren. Ferner besteht keine Möglichkeit, vor Abfahrt automatisch zu überprüfen, ob Gegenstände oder Personen eingeklemmt wurden.
- die Abfahrt im Ausgangsbahnhof erfolgt manuell mit reduzierter Überwachung durch ZSI 127. ATO kann erst nach Befahren der Balisengruppe des Ausfahr- oder Gleisabschnittssignals (Übertragung valider EoA) aktiviert werden.
- die Bremsprobe auf Wirkung ist weiterhin gemäss FDV durch den Lokführer durchzuführen. Es wäre denkbar, die Bremsprobe auf Wirkung ohne Deaktivierung von ATO vor Einfahrt in ein starkes Gefälle oder einen Kopfbahnhof durchzuführen (R 300.14, Ziffer 2.3.7). Dies wäre jedoch nur unter Erweiterung und Festlegung der Prüfungsprozesse durch die eingebundenen Systeme möglich.

### 1.17 Fahrprofil und Geschwindigkeitsschwellen FDV – ATO

Da ZSI 127 als Zugbeeinflussung zur Hintergrundüberwachung des Lokführers gedacht ist, unterscheidet sich das betrieblich nach FDV erlaubte Geschwindigkeitsprofil mit dem hinterlegten Static Speed Profile (SSP) in ZSI 127 hinsichtlich der Geschwindigkeitsschwellen.

Beispiele für diese Abweichung zwischen ATO und FDV sind u.a. die folgenden:

- **Signalisierung «kurze Fahrt» am Gleisabschnittssignal bei «Halt» signalisierendem Ausfahrtsignal**  
z.B. signalisierte Höchstgeschwindigkeit FDV  $V_{max} = 30$  km/h, die überwachte Geschwindigkeit durch ZSI liegt durch die Möglichkeit einer Befreiung bei Umschalten des Fahrbegriffs am Ausfahrtsignal jedoch höher. ATO würde demzufolge unter reiner Berücksichtigung des ZSI127-SSP unerlaubt beschleunigen, jedoch vor dem geschlossenen Ausfahrtsignal anhalten.

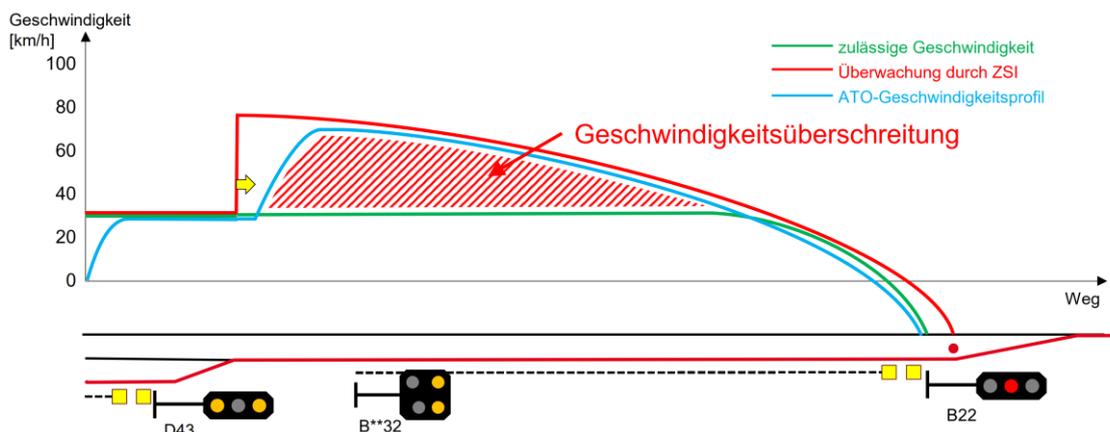


Abbildung 4 - Verletzung FDV, Beispiel Gleisabschnittssignal "kurze Fahrt"

- **aufeinanderfolgende Warnungen**  
Folgt einem Warnung zeigenden Zugsignal ein Warnung zeigendes Zugsignal, darf höchstens auf eine Geschwindigkeit von 40 km/h beschleunigt werden (FDV, R300.6, Ziffer 2.3.3). Wenn in der Annäherung das Einfahrtsignal auf Fahrbegriff 1 und Warnung wechselt, darf der Lokführer höchstens mit 40 km/h in den Bahnhof einfahren. Die Zugbeeinflussung kann nur auf die Höchstgeschwindigkeit der Fahrstrasse projiziert werden. Durch die höhere Geschwindigkeit im SSP von ZSI 127 würde ATO die erlaubte Höchstgeschwindigkeit gem. FDV überschreiten. Die Einhaltung der Bremskurve auf das geschlossene Ausfahrtsignal ist jedoch gewährleistet.

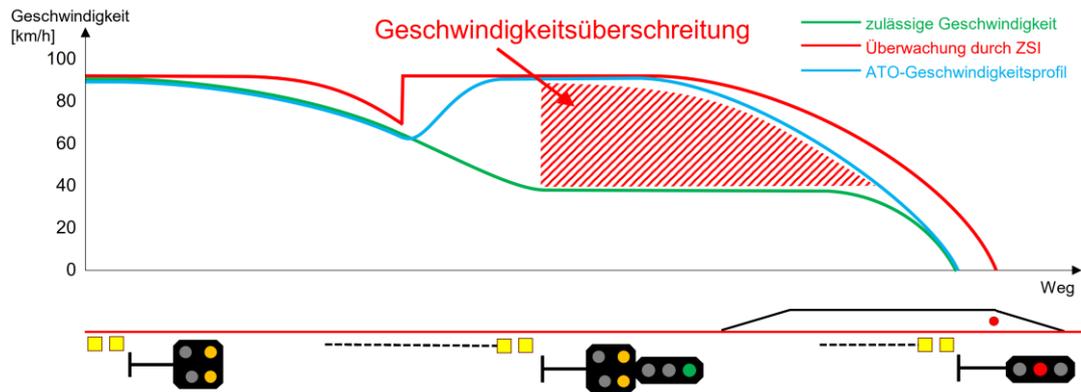


Abbildung 5 - Verletzung FDV, aufeinanderfolgende Warnungen

Die Verletzung der FDV durch die abweichenden Geschwindigkeitsprofile könnte durch eine Erweiterung der Topologie seitens ATO-TS mit Anlehnung an die UIC-SFERA Schnittstelle deutlich reduziert werden. Dabei würde ATO-TS die restriktivere FDV-Geschwindigkeit vorgeben. ATO-OB wählt die restriktivste Geschwindigkeit und hält so die FDV ein.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Speicherung von Infrastrukturdaten und Geschwindigkeitsprofilen in einem Streckenatlas auf dem Fahrzeug.

Für einen kommerziellen Betrieb mit ATO GoA2 über ZSI 127 sollten die Abweichungen von den FDV behoben oder die FDV angepasst werden, da der Lokführer als Überwacher des ATO-Systems fungiert und dabei die FDV als Bewertungsgrundlage gilt.

### 1.18 weitere relevante fahrdienstliche Erkenntnisse

Zusätzlich zu den bereits konkretisierten betrieblichen Erkenntnissen sind weitere Punkte für die technische Umsetzung eines kommerziellen ATO-Betriebes relevant:

- die Berechnung des Zielpunktes der Bremskurve unterscheidet sich zwischen ZSI und ATO. In den letzten Metern der Annäherung zu einer Geschwindigkeitsschwelle wurde die Warnkurve in den Testfahrten mehrmals überfahren.  
Eine Erklärung liegt in der Abweichung bei der Zielpunktberechnung zwischen ZSI (maximal angenommene Position der Fahrzeugspitze) und ATO nominale Position der Fahrzeugspitze). Das Vertrauensintervall muss durch ATO in der Berechnung der Bremskurve zwingend einbezogen werden.
- Im Rahmen des Projektes wurde bewusst keine Anzeige für den Lokführer implementiert.  
In einer kommerziellen Anwendung ist es unabdingbar dem Lokführer eine ergonomisch gut entwickelte Anzeige zur Verfügung zu stellen. Da der Lokführer die Fahrt überwachen muss, muss er voraussehen, auf welche Geschwindigkeit und auf welchem Haltepunkt das System steuern wird. Eine rechtzeitige Anzeige der nächsten Geschwindigkeitsschwelle und des nächsten Haltepunkts sowie der Zeitvorgabe ist erforderlich. Die Vorgaben des ATO sind anzuzeigen.

### 1.19 Zulassung und Sicherheitsnachweis

Die Integration der ATO-OB in das Fahrzeug kann grundsätzlich entlang der Richtlinie «Zulassung Eisenbahnfahrzeuge» durchgeführt werden.

Für das Gesamtsystem ATO, bzw. generell Assistenzsysteme, sind jedoch weitere Vorgaben hinsichtlich der Zulassung des Systems zu beachten (Änderungen betriebliche Vorschriften, etc.).

Im Sinne von EBV und AB-EBV handelt es sich bei ATO/Assistenzsystemen um Telematikanwendungen. Bei der Entwicklung sind daher die Vorgaben der AB-EBV zu berücksichtigen (z.B. AB-EBV AB 38 hinsichtlich konformer Entwicklung nach EN 50126-1/2, EN 50129, EN 50159).

Eine Risikoanalyse zur Beleuchtung des Zusammenspiels zwischen ATO GoA2 (SIL0), ZSL (SIL0) und dem Lokführer wurde für die Testfahrten nicht durchgeführt.

## Schlussfolgerungen und Empfehlungen

### 1.20 technische Umsetzungsfähigkeit ATO GoA2 over ZSI 127

Auf Basis der Schnittstellentests kann die technische Umsetzungsfähigkeit von ATO GoA2 over ZSI 127 auf dem ABe4/16, Serie 3111-3166 und allen anderen Meterspurbahnen mit gleicher Architektur als positiv beurteilt werden.

### 1.21 Erreichung der Projektziele

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Ergebnisse und der zu Projektbeginn definierten Fragestellungen (Tabelle 1) können die Bahnen folgenden Nutzen aus dem Projekt ziehen:

*Tabelle 6 - Erreichung der Projektziele und Ergebnisse*

**[FFr1]** *Welche Voraussetzungen müssen gegeben sein, damit herstellerunabhängige ATO-OBU eingesetzt werden können (Offenlegung der Schnittstellen/Protokoll)?*

**[FFr2]** *Sind Anpassungen der TSI Schnittstellendefinition notwendig, damit die Bedürfnisse der Meter- und Spezialspurbahnen/Trambahnen abgedeckt werden können?*

**[FFr3]** *Falls Anpassungen notwendig werden, stellen sich die Fragen nach*

- *Art und Ausprägung der Schnittstellen*
- *Funktionalitäten der ATO-OBU*

**Ergebnis:**

- Die Voraussetzungen für eine Modularität im Bereich ATO-OBU wurden mit der Offenlegung und dem Test der Schnittstellen geschaffen. Bahnen, die in einer konkreten Projektumsetzung von einer ATO GoA2 Lösung ausgehen wollen, können von den getesteten Softwareständen und Schnittstellen der Systeme profitieren.
- Es konnte gezeigt werden, dass die TSI-Standards im Bereich ATO und im vorgegebenen Testsetup nur geringfügig angepasst werden müssen.
- Durch die Standardisierung der Schnittstellen mit den statischen und dynamischen Tests konnte ein rolloutfähiges System (heute noch ohne Zulassung) unter realen Bedingungen gefahren werden.
- Das Zugbeeinflussungssystem ZSI 127 nach ZBMS-Standard ist für eine ATO GoA2-Lösung, bei Behebung der erwähnten Erkenntnisse, geeignet. Es bestehen jedoch noch offene Fragen bezüglich betrieblicher Konformität und Sicherheit, deren Untersuchung nicht Bestandteil des Projekts waren.

**[FFr4]** *Inwiefern können Investitionskosten mittels standardisierter Schnittstellen eingespart werden und gleichzeitig die Innovation gefördert werden?*

**Ergebnis:**

- Die Offenlegung und Standardisierung von Schnittstellen trägt dazu bei, dass Innovation im Bereich ATO-OBU stattfinden kann.
- Besonders hervorzuheben ist, dass die Zusammenarbeit mit den jeweiligen Systemlieferanten und den unterschiedlichen Interessen sehr erfolgreich war. Mit dieser Motivation können die Bahnen weitere innovative Projekte in Angriff nehmen.

## 1.22 notwendige Weiterentwicklung

Auf Basis der Erkenntnisse des Projekts sind folgende Punkte zur Weiterentwicklung notwendig:

- Anpassung der definitiven Standardversionen SUBSET-130 und SUBSET-139 für den Einsatz bei den Meterspurbahnen als SUBSET-130M und SUBSET-139M und Veröffentlichung der R RTE 48510
- Detaillierung der möglichen Problemlösung zu den Verletzungen der FDV, resp. unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen zwischen ZSI und FDV für eine Einführung von ATO GoA2 via ZBMS.

Hier ist festzuhalten, dass die Diskrepanzen im Geschwindigkeitsprofil zwischen ZSI 127 und FDV langfristig nur durch eine Übertragung der betrieblich erlaubten Geschwindigkeit durch ein Zugbeeinflussungssystem mit Führerstandssignalisierung, resp. ohne Hintergrundüberwachungscharakter, erreicht werden kann.

- Es sind weitere Arbeiten zum Sicherheitsnachweis notwendig
- das Live-Zusammenspiel zwischen dem Leit-/Dispositionssystem und ATO-TS wurde in den Testfahrten nicht beleuchtet (Stand-alone Lösung ATO-TS und TMS ohne direkte Änderung der Produktionsvorgaben aus der Betriebszentrale). Die Schnittstelle zwischen Dispositionssystem, Leitsystem und ATO-TS muss für die Meter-/ Spezialspurbahnen daher nochmals beleuchtet und getestet werden. Bei den Normalspurbahnen konnten diese Tests durch die Nutzung des SBB-Dispositionssystems RCS mit ATO-TS Testumgebung bereits durchgeführt werden.

## 1.23 notwendige Umsysteme für die kommerzielle Einführung

Für die kommerzielle Einführung wird die Anbindung des ATO-TS Servers an ein TMS (Traffic Management System) benötigt, um automatisch die entsprechenden Journey Profiles und Segment Profiles zu erzeugen (siehe oben).

Die präzisen Zeitvorgaben des TMS aufgrund der Prognose sowie der Konflikterkennung und Konfliktlösung bilden die Grundlage um den Nutzen des automatischen Fahrens wie die Steigerung der Kapazität, Verbesserung der Fahrplanstabilität und Pünktlichkeit sowie Energieeinsparungen zu erreichen.

Durch die Kombination von ATO und optimalen Zeitvorgaben durch das TMS wird präzises Fahren ermöglicht und Signalhalte werden vermieden. Dies hilft nach Verspätungen, die Zeit bis zur Fahrplantreue zu verkürzen. ATO verringert zudem die Zugfolgeabstände durch konstantes Fahren und späteres Bremsen und erhöht damit die Kapazität der Strecke.

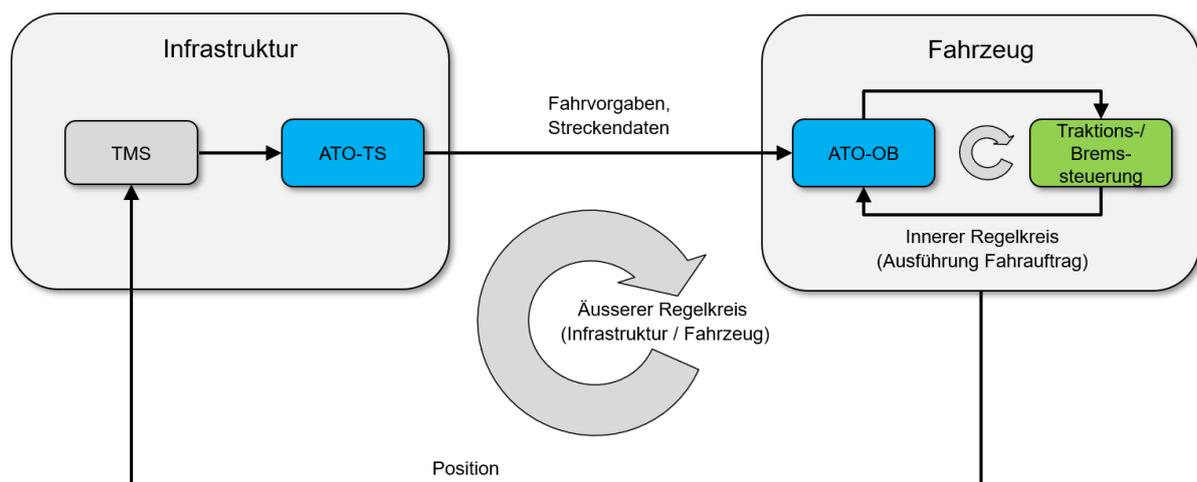


Abbildung 6 - Regelkreise und Zusammenwirken der Systeme

Ausgehend vom Produktionsplan und den Zugpositionen berechnet das TMS laufend eine aktuelle Prognose für den zukünftigen Verlauf der Zugfahrten. Erkannte Konflikte werden offenbart und Lösungen berechnet, um einen konfliktfreien Fahrplan zu erreichen bzw. die Auswirkungen unvermeidlicher Konflikte zu minimieren. Die Lösungsvorschläge werden automatisch umgesetzt oder dem Disponenten zur Ausführung angeboten. Aufgrund der aktuellen Prognose macht das TMS der ATO-TS Vorgaben,

wann die Züge wo sein sollen. Die ATO-TS liefert diese Fahrvorgaben (Journey Profiles) und die Streckendaten (Segment Profiles) an die ATO-OB.

Die ATO-OB und die Fahrzeugsteuerung bilden den inneren Regelkreis. Dessen Aufgabe ist es, den Fahrauftrag möglichst genau gemäss den Zeitvorgaben auszuführen. Die ATO-OB verfügt über ein detailliertes Modell des Fahrzeugverhaltens und kann so das Verhalten des Fahrzeugs präzise vorausberechnen und entsprechend optimal steuern. Mit dem inneren Regelkreis allein lässt sich - ein konfliktfreier Fahrplan vorausgesetzt – bereits ein optimaler Betrieb unter regulären Bedingungen realisieren.

Das ATO-System und das TMS bilden den äusseren Regelkreis. Das TMS ermöglicht eine übergreifende Optimierung des Betriebes unter Berücksichtigung der gesamten Verkehrslage. Dies ist vor allem dann interessant, wenn der Fahrplan durch Verspätungen oder Betriebsstörungen destabilisiert wird. Mittels des äusseren Regelkreises können die Auswirkungen dieser Störungen minimiert werden. Das TMS kann über Fahrwegänderungen und/oder Optimierung der Zeitvorgaben in den Betriebsablauf eingreifen.

Der äussere Regelkreis ist darauf angewiesen, dass der innere Regelkreis vorhersehbar reagiert, was bei einer ATO-Anwendung gegeben ist. Umgekehrt ist der innere Regelkreis darauf angewiesen, dass der äussere Regelkreis erfüllbare Vorgaben generiert. Dies bedingt, dass der äussere Regelkreis das physikalische Leistungsvermögen der Fahrzeuge kennt und entsprechend berücksichtigt. Durch die so gewonnene Präzision können die Pufferzeiten (Reserven) zwischen den Zügen reduziert werden.

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Fragenkatalog und Projektziele.....	10
Tabelle 2 - Vorgehensweise und Zeitplan.....	10
Tabelle 3 - verwendete TSI-ATO-Spezifikationen.....	12
Tabelle 4 - SW-Konfiguration ATO/ZSI/Fzg .....	14
Tabelle 5 - Ergänzungen und Diskrepanzen zu den TSI-ATO-Spezifikationen.....	16
Tabelle 6 - Erreichung der Projektziele und Ergebnisse.....	22

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Ziel-Systemarchitektur nach R RTE 48510 .....	11
Abbildung 2 - Netzwerkarchitektur und Verkabelung ATO-Ausrüstung Testfahrzeug ABe 4/16.....	12
Abbildung 3 - erwartete Bremskurve ATO vor Vorsignal .....	17
Abbildung 4 - Verletzung FDV, Beispiel Gleisabschnittssignal "kurze Fahrt" .....	20
Abbildung 5 - Verletzung FDV, aufeinanderfolgende Warnungen .....	21
Abbildung 6 - Regelkreise und Zusammenwirken der Systeme .....	23

## Referenzen

[001]	Projektauftrag /-beschreibung ATO VöV Testfahrten
[002]	TSI ERTMS/ATO Spezifikationen <ul style="list-style-type: none"> <li>- SUBSET-125</li> <li>- SUBSET-126</li> <li>- SUBSET-130</li> <li>- SUBSET-139</li> </ul> Versionen der TSI CSS 2023 (V1.0.0) verfügbar auf der Website der Europäischen Eisenbahngentur <a href="#">ERA</a>
[003]	Entwurf SUBSET-125, SUBSET-126, SUBSET-130, SUBSET-139 gem. Tabelle 1
[004]	Spezifikation SUBSET-130M ( <i>Veröffentlichung mit R RTE 48510</i> )
[005]	Spezifikation SUBSET-139M ( <i>Veröffentlichung mit R RTE 48510</i> )
[006]	SD100032809-Stadler_Test_Protocol_static
[007]	ATO@RhB_Protokoll_Depottest_Fst_A_20230424
[008]	ATO@RhB_Protokoll_Depottest_Fst_B_20230424
[009]	SD100033905-Stadler_Test_Protocol_dynamic
[010]	ATO@RhB_Protokoll_dynamische_Tests_20230703
[011]	ATO@RhB_Protokoll_dynamische_Tests_20230908
[012]	AB-EBV 38.2 Ziff. 3, SN-EN 62267