

Automated Nano Transport System – Ansatz zur Entwicklung autonomer Schienenfahrzeuge

Schlaht, Jürgen¹, Frink, Lukas², Laumen, Peter³, Schüttert, Andreas³,
Schindler, Christian², Nießen, Nils³

¹Siemens Mobility MLT ITE

²Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme, RWTH Aachen

³Verkehrswissenschaftliches Institut, RWTH Aachen

Zusammenfassung

Im vorliegenden Aufsatz wird die Ideenfindung und Spezifikation für ein kleines, fahrerlos operierendes Schienenfahrzeug beschrieben, das den Bahnverkehr insbesondere auf Schwachlaststrecken attraktiver, kostengünstiger und sicherer machen und somit die systembedingten Vorteile der Schiene gegenüber der Straße auch nach Aufkommen autonomer, elektrisch betriebener Kraftfahrzeuge gewährleisten soll.

Keywords: Autonomes Fahren, Digitalisierung, Elektromobilität, Anforderungsmanagement

1 Einleitung

Gegenwärtig befindet sich die Fahrzeugtechnik bedingt durch die fortschreitende Digitalisierung und Automatisierung in einer Phase des technologischen Umbruchs. Daneben zeichnen sich weitere globale Megatrends wie etwa die Urbanisierung oder die fortschreitende Konnektivität ab. In der Kraftfahrzeugtechnik zeigt sich dies

insbesondere durch die zunehmenden Aktivitäten in der Erforschung und Entwicklung der Elektromobilität und des assistierten, automatisierten und autonomen Fahrens. Spätestens in der Mitte der 2020er-Jahre rechnen Experten mit der Markteinführung vollautonomer Pkw [1].

Durch vollautonome Fahrzeuge kann der Straßenverkehr gegenüber dem heutigen Stand der Technik weitaus attraktiver und auch sicherer gestaltet werden. Diese Entwicklung wird die Schienenfahrzeugbranche in Zukunft vor große Herausforderungen stellen. Es besteht die Gefahr der zumindest teilweisen Substitution bisher schienengebundener Verkehrsleistungen durch autonome Straßenfahrzeuge, da bisherige Vorteile des Schienenverkehrs, wie die Nutzbarkeit der Reisezeit, verloren gehen könnten [2]. Dies gilt sowohl für den Personenverkehr als auch für den Güterverkehr.

Um diese Herausforderung zu bewältigen, muss die Bahnbranche gegenüber dem zukünftig autonomen Straßenverkehr zwingend gleichwertige oder bessere Lösungen entwickeln. Das heißt, die systemischen Vorteile des Schienenverkehrs wie u. a. hoher Fahrkomfort und Bewegungsmöglichkeiten im Fahrzeug müssen mit den wachsenden Möglichkeiten der Digitalisierung vereint werden.

Hierzu werden zunächst die Eigenschaften und das Potential des autonomen Verkehrs erläutert. Dabei werden auch Reiseketten betrachtet, aus welchen die Vor- und Nachteile diesbezüglich abgeleitet werden können. Anschließend wird das „Automated Nano Transport System“ (ANT-System) vorgestellt, welches die Lösung für die zuvor erläuterten Probleme darstellen soll. Abschließend wird die Methodik vorgestellt, mit welcher die Spezifikationen für das ANT-System entwickelt werden sollen.

2 Autonomer Verkehr

2.1 Was heißt autonomer Verkehr für Schienenfahrzeuge?

Das autonome Fahren im Automobilsektor wird in den Medien häufig beschrieben, wobei nur selten eine stringente Trennung zwischen den Begriffen autonom, automatisch und automatisiert vorgenommen wird. Die Society of Automotive Engineers (SAE) nimmt für den Automobilsektor eine standardisierte Definition in sechs Stufen vor (Levels of Automation). Der Automatisierungsgrad wird von „ohne Automatisierung“ über „assistiertes Fahren“ über drei Stufen mit zunehmender Teilautomatisierung bis zur Vollautomatisierung gesteigert [3]. In vielen

Veröffentlichungen wird der Begriff „autonom“ als Synonym zu „vollautomatisiert“ benutzt.

Für den Schienenfahrzeugsektor wird gemäß dem durch die International Association of Public Transport (UITP) eingeführtem Grade of Automation (GoA) streng zwischen automatischem bzw. automatisiertem und autonomem Betrieb unterschieden. Der automatische/automatisierte Verkehr wird von außen geleitet und überwacht (Beispiel: fahrerlose U-Bahn in Nürnberg, GoA 3-4). In einem entmischten System, in dem nur autonome Fahrzeuge verkehren, bewegt sich das Fahrzeug hingegen vollkommen unabhängig von außen und wird über eine fahrzeuginterne Sensorik mittels künstlicher Intelligenz gesteuert. Assistenzsysteme können sowohl den Fahrer als Vorstufe zum autonomen oder auch zum vollautomatisierten Fahren unterstützen. Beim autonomen Fahren (GoA 4) können diese Systeme zur Erhöhung der Performanz beitragen. [4]

Abbildung 1 zeigt einen Vergleich der verschiedenen Automatisierungsstufen im Schienen- und Straßenverkehr:

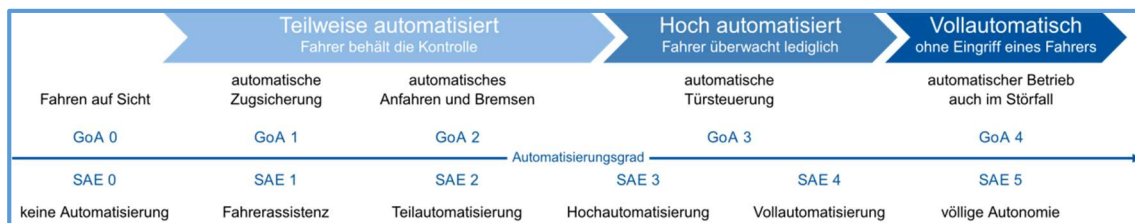


Abbildung 1: Vergleich der verschiedenen Automatisierungsstufen im Schienen- und Straßenverkehr [5]

2.2 Potentiale des autonomen Schienenverkehrs

Derzeit existiert bereits eine Vielzahl von fahrerlos betriebenen Anlagen, die auf einem unabhängigen Bahnkörper verkehren und dem automatischen Verkehr zuzuordnen sind.

Im Regional- wie auch im Fernverkehrssektor lassen sich Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern nur unter Einsatz erheblicher finanzieller Mittel vermeiden. Ein ausschließlich automatischer, von außen gesteuerter Betrieb der Fahrzeuge scheidet damit aus. Der Verkehrsraum bzw. das Gleis ist für eine fahrerlose Nutzung permanent auf äußere Einwirkungen zu überwachen. Demnach könnten sämtliche Gleisanlagen mit ortsfesten Überwachungseinrichtungen ausgestattet werden oder autonome Fahrzeuge mit sensorischer Umfelderkennung und -überwachung werden eingesetzt.

Der autonome Schienenverkehr bietet einige signifikante Vorteile gegenüber dem heutigen Bahnsystem. Die Kapazität ist auf den Hauptverkehrsachsen derzeit durch Block- und Signalabstände begrenzt. Netzengpässe stehen häufig einem besseren Verkehrsangebot auf der Schiene entgegen. Vorteile ergeben sich bei kleinen autonomen Einheiten jedoch nur, wenn die Leit- und Sicherungstechnik angepasst wird. Autonome Fahrzeuge müssen mindestens im absoluten Bremswegabstand (Moving Block) oder besser im relativen Bremswegabstand fahren können.

Ein weiterer Vorteil des autonomen Schienenverkehrs ist die Komfortsteigerung durch die potentielle Verringerung von Umstiegen. Zudem ist eine private Nutzung von ANT-Einheiten etwa auf Fernreisen oder zur Nutzung der Reisezeit für berufliche Besprechungen auf Dienstreisen denkbar.

In Großstädten wird der schienengebundene Verkehr, insbes. die U-Bahn, aber auch Stadt- und Straßenbahn, durch autonome Kraftfahrzeuge in Anbetracht der signifikant höheren Beförderungsleistung der Bahn nicht verdrängt werden.

Der von einem autonomen Straßenfahrzeug okkupierte Verkehrsraum bleibt nämlich derselbe wie der eines konventionellen Fahrzeugs. Linderung könnte sich nur bei einer Änderung des Nutzerverhaltens einstellen, d. h. wenn Kraftfahrzeug-Nutzer ein autonomes Kraftfahrzeug nicht selbst besitzen wollen, sondern es hauptsächlich als autonomes Taxi nutzen. Das autonome Taxi wird gegenüber konventionellen Taxis kostengünstiger sein und jederzeit und überall zum Einsatz bereitstehen. Dann könnte sich die Zahl der Straßenfahrzeuge in den Städten verringern, da die einzelnen Fahrzeuge intensiver genutzt würden und nicht zu einem Großteil ihrer Lebensdauer parken würden. Dadurch stände in den Städten mehr Fläche zur Verfügung, die derzeit als Parkraum genutzt wird. Trotzdem könnten sich zu den Rush-Hour-Zeiten weiterhin Staus bilden, sofern keine Änderung der präferierten alleinigen Nutzung des Fahrzeugs eintritt.

In kleineren Städten sowie auf dem Land wird mit autonomen Straßenfahrzeugen eine Flexibilität entstehen, die der heutige schienengebundene Verkehr, der sich meist auf Regionalverkehr mit großen Taktzeiten beschränkt, dort in diesem Maße nicht bieten kann. Hier könnte schienengebundener Verkehr mit kleinen, häufig oder „auf Zuruf“ verkehrenden autonomen Einheiten die Attraktivität des Verkehrsträgers Schiene deutlich steigern, sofern das Problem der „letzten Meile“ zufriedenstellend gelöst werden kann. Allerdings wäre eine ähnliche Wirkung auch mit autonomen Mini- bzw.

Midibussen erreichbar. Die autonomen Schienenfahrzeuge müssen sich also qualitativ stark vom Bus abheben.

Fernreisen mit dem Zug werden aus drei Gründen von vielen Reisenden abgelehnt. Erstens sind die vielen Hürden zu nennen, die vor, während und nach der eigentlichen Zugfahrt zu bewältigen sind – je mehr Umstiege und je umständlicher die An- und Abreise zum Start- und vom Zielbahnhof, desto geringer die Attraktivität. Zweitens werden die vermeintlich hohen Kosten beklagt. Dabei vergleichen die meisten Menschen den Preis für eine Zugfahrt lediglich mit den Kraftstoffkosten der Fahrt mit dem eigenen Pkw zzgl. evtl. noch anfallender Maut und nicht die Vollkosten des Kfz. Drittens wird von vielen Reisenden die Nähe zu fremden Menschen als unangenehm empfunden.

Bei einem Vergleich der Reiseketten von Fernreisen im konventionellen Schienenverkehr und in Straßenfahrzeugen lässt sich ein deutlicher Unterschied in der Anzahl der Reisestationen erkennen. Für den Schienenverkehr ist die umfangreiche Reisekette in Abbildung 3 beschrieben.



Abbildung 3: Stationen einer Reise mit einem Schienenfahrzeug

Der angenommene Fahrtverlauf in einem autonomen Straßenfahrzeug erscheint aufgrund der Anzahl der Reisestationen deutlich attraktiver als eine Reise mit einem schienengebundenen Verkehrsmittel, s. Abbildung 4:

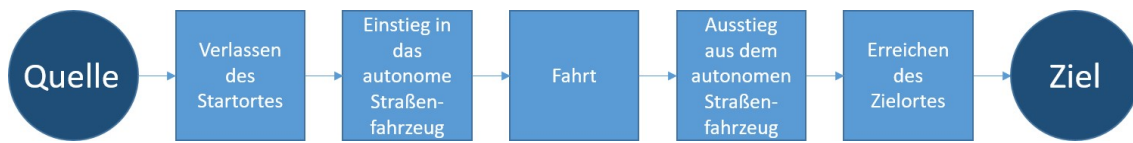


Abbildung 4: Stationen einer Reise mit einem autonomen Straßenfahrzeug.

Demgegenüber sind jedoch bei längeren Fahrten mit dem autonomen Straßenfahrzeug eventuelle Pausen für den Toilettengang, einen Imbiss oder das Aufladen der Energiespeicher (elektrisch oder konventionell) der Reisekette hinzuzufügen. Die genannten Elemente entfallen bei einer Reise mit Fernreisezügen, welche über Waschräume, ein Bordrestaurant sowie permanente elektrische Energieversorgung verfügen.

Analog können Vorteile von autonomen Schienenfahrzeugen für den Güterverkehr ermittelt werden. Durch sie kann der Einzelwagenverkehr deutlich attraktiver gestaltet werden, da keine zeitaufwändige Zugzusammenstellung erfolgen muss, sondern dies automatisiert abgewickelt werden kann. Dadurch ist eine deutliche Effizienzsteigerung im Einzelwagenverkehr zu erwarten.

3 Automated Nano Transport System

Als Reaktion auf die oben beschriebenen Herausforderungen entwickelt Siemens Mobility derzeit unter anderem mit mehreren RWTH-Instituten ein fahrerloses, vollständig autonom verkehrendes und flexibel einsetzbares Schienenverkehrs-System. Besonderes Charakteristikum der Fahrzeuge ist die strikte Trennung zwischen einem eigenständigen Fahrwerksteil (Drive Unit) und einem flexibel, an Kundenwünsche anpassbarem Aufbau (Life Unit, vgl. [Abbildung 5](#)). Damit besteht die Möglichkeit, die Life Unit auch als Cargo Unit auszuführen, etwa zum Transport von Containern.

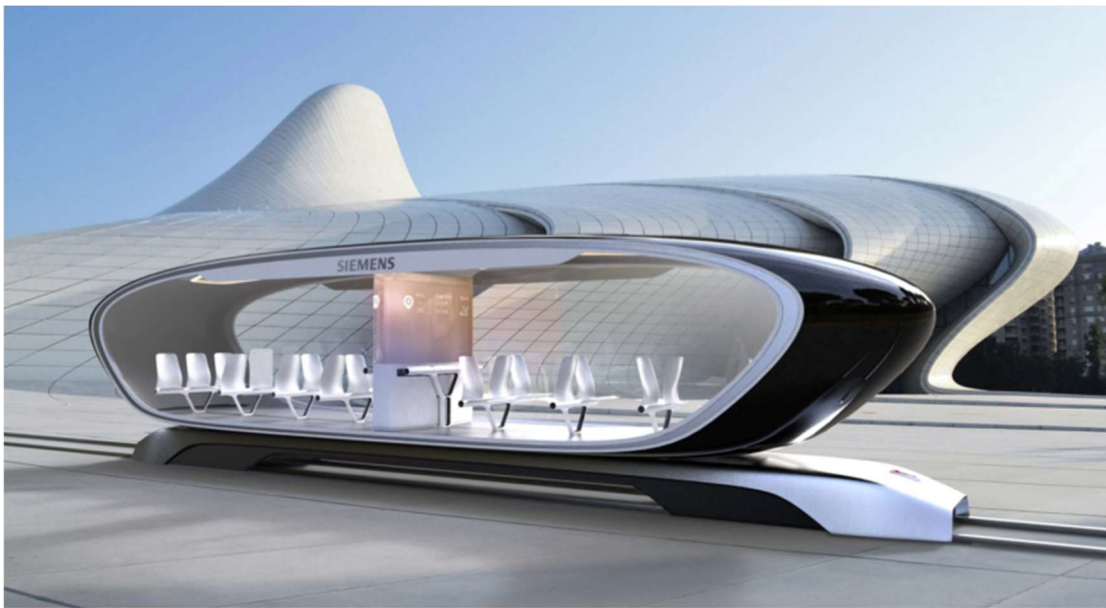


Abbildung 5: ANTS-Designstudie, autonomes Kleinstfahrzeug bestehend aus Drive Unit und Life Unit für den individualisierten Transport von Fahrgästen (© SIEMENS AG)

Der Antrieb der autonomen Kleinstfahrzeuge erfolgt rein elektrisch über einen internen Energiespeicher (unabhängig vom Fahrdradt) und damit lokal emissionsfrei. Bedingt durch die aktive Sicherheit mittels sensorischer Streckenüberwachung kann auf passive Sicherheitseinrichtungen weitgehend verzichtet werden, wodurch signifikante Gewichtseinsparungen gegenüber konventionellen Fahrzeugen zu erwarten sind. Die maximale Geschwindigkeit der autonomen Kleinstfahrzeuge soll auf 120 km/h begrenzt sein.

Anwendungsfälle der autonomen Kleinstfahrzeuge sind für verschiedene Betriebsszenarien denkbar. Die Eignung der Fahrzeuge dafür muss jedoch noch bewertet werden. Die möglichen Betriebsszenarien sind in Anlehnung an die heutigen Geschäftsfelder im Schienenfahrzeugsektor gewählt:

- Stadtverkehr (Light Rail, Straßen- und Stadtbahn)
- S-Bahn / Metroverkehr in den Metropolen (Commuter)
- Regional- bzw. Nahverkehr (Regional)
- Fernverkehr (Intercity)
- Cargoverkehr (Cargo-Unit anstelle der Life-Unit)

Wesentliches Bewertungskriterium ist die Erfüllung der Kundenanforderungen. Der Betrieb mit autonomen Schienenfahrzeugen muss für den Kunden Vorteile gegenüber

den für die Zukunft erwarteten Konkurrenzprodukten bringen. Der Regionalverkehr kann durch flexibel abrufbare Kleinfahrzeuge gegenüber dem heutigen Betriebskonzept (starre Fahrpläne in Verbindung mit relativ großen Zügen und großen Zugfolgezeiten) deutlich attraktiver gestaltet werden. Denkbar ist sogar einen Wechsel der Life Unit auf eine straßengängige Drive Unit, sodass ein Tür-zu-Tür-Verkehr und umsteigefreies Reisen möglich wird.

Auch im Fernverkehr sind umsteigefreie Verbindungen möglich. Durch kleine Einheiten sind Zwischenhalte nicht mehr notwendig und die Fahrt kann von Start bis zum Ziel abgewickelt werden. Auch wenn wegen der fahrzeugseitigen Streckenüberwachung und des auf Sensorreichweite einzuhaltenden Bremswegs mit geringeren Geschwindigkeiten gefahren werden muss, können durch den Entfall von Zwischenhalten auf gewissen Relationen im Vergleich zum heutigen Hochgeschwindigkeitsverkehr äquivalente Reisezeiten (von Tür zu Tür gerechnet) erreicht werden. Durch die niedrigere Maximalgeschwindigkeit reduziert sich ferner die notwendige Antriebsleistung des Fahrzeuges sowie die Masse des Energiespeichers erheblich. Alternativ könnten sich autonome Schienenfahrzeuge an Knoten zu Ganzzügen konfigurieren und am Zielknoten wieder vereinzeln. Eine weitere Alternative wäre die Verladung der Life Units auf Ganzzüge am Startknoten und eine Umladung auf kleine Drive Units am Zielknoten. In beiden Fällen könnte zwischen den Knoten konventionell signalgesichert und damit sehr schnell gefahren werden.

Auch wäre das Problem, mit fremden Menschen in einem geschlossenen Raum zu sein, deutlich geringer und könnte sogar bei individueller Anmietung einer Life Unit eliminiert werden.

4 Methodik der Fahrzeugspezifikation

Die Entwicklung der Spezifikation des Automated Nano Transport Systems (ANT-System) wurde anhand einer bei Siemens entwickelten und von den beteiligten RWTH-Instituten weiter detaillierten Methode durchgeführt. Ausgangspunkt ist dabei die Erstellung eines Stakeholder¹-übergreifenden Anforderungsprofils. An diesem Anforderungsprofil wird das ANT-System gespiegelt und daraus die Fahrzeugspezifikation weiterentwickelt und verfeinert.

¹ Als Stakeholder wird hier eine Person oder Gruppe bezeichnet, die ein berechtigtes Interesse am System Bahn hat. [9]

4.1 Advanced Business and Innovation Model (ABIM)

Um eine Aussage über die Gestaltung eines Produktes treffen zu können, ist es zunächst erforderlich, die Anforderungen aller das Produkt tangierenden Stakeholder zu kennen. Als Vorarbeit sind im Rahmen der Erstellung eines Stakeholder-übergreifenden Anforderungsmodells (Advanced Business und Innovation Model (ABIM)) elf Stakeholder identifiziert worden. Jeder dieser Stakeholder hat zahlreiche Anforderungen an das System Bahn. Die Stakeholder sind:

- Passagier
- Fahrzeugeigner
- Verlader
- Fahrzeughersteller
- Passagier-Eisenbahnverkehrsunternehmen
- Cargo-Transportunternehmen
- Infrastrukturbetreiber
- Politik & Verwaltung
- Gesellschaft
- Umwelt sowie
- Beschäftigte im System Bahn

Die Stakeholdergruppen sind zum Teil in weitere Untergruppen unterteilt. So ist der Infrastrukturbetreiber in den Betreiber Schienenweg, den Betreiber Energienetz, den Betreiber Stationen und Bahnhöfe und den Betreiber Rangierbahnhöfe unterteilt. Damit umfasst ABIM systematisch und strukturiert alle Stakeholder des Bahnsystems. Verschiedene Stakeholder haben verschiedene Interessen, was dazu führt, dass sich die Anforderungen der Stakeholder zum Teil ergänzen aber auch widersprechen. In Summe konnten mit dieser Methode ca. 2.500 Einzelanforderungen identifiziert werden. Die Anforderungen sind dabei universell in Bezug auf das System Bahn zu verstehen. Für ein spezifisches Projekt muss eine Anpassung an die konkrete Aufgabe bzw. das konkrete Fahrzeugprojekt erfolgen. So entfallen für ein Regionalverkehrsprojekt z. B. viele Anforderungen, die ausschließlich an Fern- oder Güterverkehrssysteme gestellt werden. In dem hier beschriebenen Fall wird ABIM auf den Einsatzbereich des ANT-Systems mit dem Ziel der Ermittlung der Anforderungserfüllung durch ein ANT-System angewendet. Allerdings liegt hier die Herausforderung darin, dass der Einsatzbereich noch nicht genau festgelegt ist.

4.2 Spezifikation des ANT-Systems

Nachstehend werden die Methodik und Durchführung der Spezifikation für das ANT-System erläutert sowie die daraus abgeleiteten funktionalen Anforderungen für Fahrzeug und Betriebsszenarien dargelegt.

4.2.1 Methodik der Spezifikation

Zunächst werden die in Kapitel 3 aufgeführten Betriebsszenarien herangezogen. Anschließend erfolgt eine Wirkungsabschätzung der zugrundeliegenden Definition des ANT-Systems bezüglich der in ABIM erfassten Anforderungen der jeweiligen Stakeholder. Die Methodik lehnt sich dabei stark an die aus der Quality Function Deployment (QFD) bekannten Methode des „House of Quality“ an. Neben der verbesserten Darstellung der Kundenwünsche können bei Anwendung dieser Methodik kritische Anforderungen und Produktfunktionen leichter identifiziert werden. [6][7]

4.2.1.1 Gewichtung der Stakeholder-Anforderungen

Als Ausgangslage für alle Betriebsszenarien werden etwa 40 vordefinierte charakteristische Merkmale des bisher bekannten ANT-Systems betrachtet, bspw. eine Fahrzeuglänge von 12 m, die Zweiteilung von Drive Unit und Life Unit oder der vollelektrische Antrieb mit integriertem Energiespeicher. Diese werden durch szenariospezifische Merkmale ergänzt, etwa die Reichweite der Drive Unit variierend je nach Betriebsszenario. Gleichzeitig wird eine Gewichtung der bereits bekannten ABIM-Anforderungen für die jeweiligen Betriebsszenarien vorgenommen. Die Gewichtung selbst erfolgt auf verhältnismäßig einfache Art. Die Stakeholder-Anforderungen werden zunächst lediglich auf den Stufen *must have*, *should have* und *nice to have* gewichtet. Zusätzlich werden hinsichtlich der autonomen Schienenfahrzeuge irrelevante ABIM-Anforderungen mit der Gewichtung *irrelevant* versehen. Abbildung 6 gibt beispielhaft die Gewichtung eines Ausschnittes der ABIM-Anforderungen für die verschiedenen Betriebsszenarien für den Stakeholder Fahrzeughersteller wieder:

Id Nr	Pfad	Typ	Name	Szenario 1 Light Rail	Szenario 2 Commuter	Szenario 3 Regio	Szenario 4 Intercity	Szenario 5 Cargo
1	1	Stakeholder	Passagier					
2	1 1	Anforderung	Kurze Reisezeit	Should have	Should have	Should have	Must have	Irrelevant
3	1 1 1	Anforderung	Hohe Fahrgeschwindigkeit	Nice to have	Should have	Should have	Should have	Irrelevant
4	1 1 1 1	Anforderung	Moderne Züge	Must have	Must have	Must have	Must have	Irrelevant
5	1 1 1 2	Anforderung	Nutzung Fernverkehr					Irrelevant
6	1 1 2	Anforderung	Kurze Reisezeit von Tür-zu-Tür	Should have	Should have	Should have	Should have	Irrelevant
7	1 1 2 1	Anforderung	Intermodale Reisekette	Irrelevant	Should have	Must have	Must have	Irrelevant

Abbildung 6: Gewichtung der ABIM-Anforderungen am Beispiel des Stakeholders
Passagier (Ausschnitt)

Zur späteren Ermittlung eines Erfüllungsgrades der Anforderungen durch die ANTS-Systemdefinitionsmerkmale werden der Gewichtung noch numerische Werte zugeordnet (Gewichtungskennziffer: *must have* = 3, *should have* = 2, *nice to have* = 1, *irrelevant* = 0).

4.2.1.2 Spiegelung der Systemmerkmale an den Anforderungen

Die Merkmale selbst werden in einem weiteren Schritt an den im ABIM ermittelten Anforderungen der einzelnen Stakeholder gegengespiegelt. Es erfolgt dabei eine mehrstufige Wirkungsabschätzung der einzelnen Systemmerkmale. Auch hier wird wieder auf ein verhältnismäßig einfaches Gewichtungsschema zurückgegriffen. Die Wirkungen der Systemmerkmale auf die ABIM-Anforderungen der einzelnen Stakeholder werden fünfstufig bewertet. Die Skala reicht dabei von *very negative*, über *negative* und *neutral* hin zu *positive* und *very positive*. Auch hier werden die Gewichtungen wieder mit einem numerischen Wert (Wirkungskennziffer: *very negative* = -2, *negative* = -1, *neutral* = 0, *positive* = 1, *very positive* = 2) zur weiteren Ermittlung der Gesamtwirkungsabschätzung versehen.

4.2.1.3 Ermittlung des Gesamterfüllungsgrades („Priorität“)

Für die einzelnen Systemmerkmale kann dann durch Multiplikation der Wirkungskennziffer mit der zuvor erstellten Gewichtung der Anforderungen (Gewichtungskennziffer) selbst ein Gesamterfüllungsgrad („Priorität“) ermittelt werden. Dieser trifft eine Aussage über den Grad der Erfüllung der Stakeholder-Anforderungen eines einzelnen Systemmerkmals. Für die Ermittlung der Gesamtpriorität wird dabei die Wirkungsabschätzung auf der ersten Gliederungsebene innerhalb eines jeden Stakeholders („Kernanforderungen“) der ABIM-Anforderungen herangezogen. Für den Stakeholder Fahrzeughersteller sind dies als Beispiel *hohe Einnahmen*, *niedrige Ausgaben*, *positive Außenwahrnehmung* und *Zulassung*. Die Wirkungsabschätzung auf

dieser ersten Ebene basiert auf einer individuellen Einschätzung der sich unter dieser Anforderungsebene subsumierenden Einzelbewertungen. Für die Ermittlung der Gesamtpriorität wird zwecks Vergleichbarkeit der Anforderungen untereinander zusätzlich eine Normierung vorgenommen, sodass die einheitliche Gesamtpriorität Werte im Bereich zwischen -6 und 6 annehmen kann. Die Normierung wird aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Anforderungen in der ersten Gliederungsebene für die einzelnen Stakeholder notwendig.

Die auf diese Weise ermittelte Gesamtpriorität dient dann als Maß für die Bewertung der ANTS-Systemeigenschaften. Abbildung 7 zeigt schematisch die Berechnung der Gesamtpriorität.

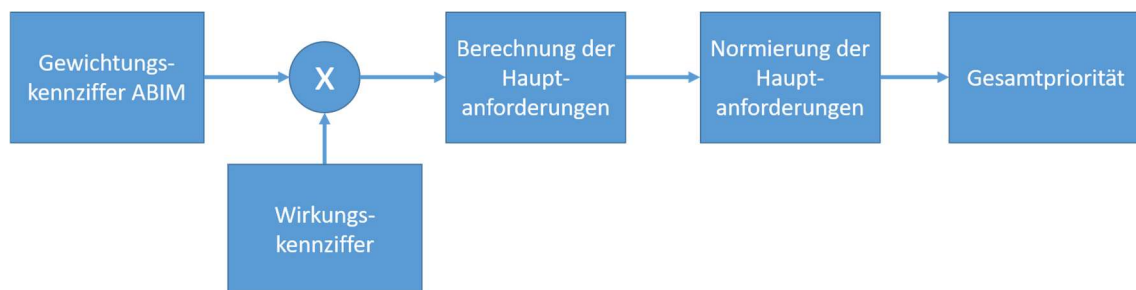


Abbildung 7: Berechnung der Gesamtpriorität

Die Vorgehensweise wird in Abbildung 8 anhand eines Ausschnitts der Bewertungstabelle am Stakeholder Fahrzeughersteller dargestellt.

Ild Nr	Pfad						Typ	Name	Szenario 4	Gewichtung	Wirkung						
											ANT Drive-Unit						
										3: Must have 2: Should have 1: Nice to have 0: Irrelevant							
										2: very positive 1: positive 0: neutral -1: negative -2: very negative							
									Regio								
									20-100 km	Priorität Gesamt	1,5	0	0,75	0	0	0	0,5
1	6							Stakeholder	Supplier	-							
2	6	1						Anforderung	hohe Einnahmen	3	0	0	1	0	0	0	0
3	6	1	1					Anforderung	hoher Fahrzeugpreis	2	0	0	1	0	0	0	0
4	6	1	1	1				Anforderung	Erzielung eines Alleinstellungsmerkmals	3	0	0	1	0	0	0	0

Abbildung 8: Beispiel der Widerspiegelung der Systemdefinition an den Stakeholder-Anforderungen (Ausschnitt für den Stakeholder Fahrzeughersteller)

Um eine Aussage über den Erfüllungsgrad eines gesamten ANTS-Szenarios für die verschiedenen Stakeholder zu treffen, eignet sich hingegen eine Betrachtung auf Anforderungsebene besser. Hierzu werden die Erfüllungsgrade einer Anforderungszeile (jeweils für die ersten Anforderungsebenen) addiert, diese Summe mit der Gewichtungskennziffer multipliziert und auf die Anzahl der Elemente in der ersten Ebene normiert. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien mit unterschiedlich vielen Systemmerkmalen zu gewährleisten, erfolgt schließlich noch eine Normierung über die Anzahl der Systemmerkmale. Es kann somit letztendlich eine Aussage über den Grad der Anforderungs-Erfüllung des jeweiligen ANT-Gesamtsystems (als Summe der Einzel-Systemmerkmale) getroffen werden.

Im iterativen Prozess der Wirkungsabschätzung können auch Änderungen bzw. Ergänzungen in der Systemdefinition vorgenommen werden sofern sie als notwendig erachtet werden. Der iterative Prozess ist in Abbildung 9 dargestellt:



Abbildung 9: Iterationsprozess

Es können schließlich Schlussfolgerungen bzw. Systemspezifikationen für die Fahrzeuge, die Infrastruktur und den Betrieb des ANT-Systems ausgearbeitet werden. Ziel der Spezifikation ist die grobe Definition der autonomen Schienenfahrzeuge und des von diesen zu erfüllenden Anforderungsprofiles. Aufbauend auf der Grobspezifikation kann dann eine weitere konstruktive Umsetzung erfolgen.

4.2.2 Systemspezifikationen

Auf Basis der Wirkungsabschätzung konnten bereits einige Systemspezifikationen für die Fahrzeuge abgeleitet werden. Diese werden nachstehend beschrieben.

Geometrische Abmaße

Die Fahrzeuglänge wird zunächst auf 12 m festgesetzt. Dies erfolgt in Anlehnung an die standardisierten 40 Fuß Container aus dem Güterverkehr. Die Fahrzeughöhe und -breite sind abhängig vom Anwendungsfall. Nach BOStrab ist die Breite auf 2,65 m begrenzt. Die Höhe ist auf 4,0 m über Straße begrenzt. Für den Anwendungsfall nach EBO wird eine Breite von 3 m festgesetzt, die Höhe ist auf ca. 4,31 m über Schienenoberkante begrenzt. Die Drive Unit soll dabei möglichst niedrig sein, um maximale Höhe für die Life Unit zu gewähren. Die Einstiegshöhe für die Life-Unit soll ca. 760 mm betragen. Wird der Boden der Life-Unit mitbetrachtet, bleibt für die Drive-Unit eine maximale Höhe von ca. 700 mm. Daraus resultiert ein Raddurchmesser von etwa 600 mm. Im Güterverkehr sind aufgrund der erforderlichen Achslasten dabei ggf. größere Raddurchmesser zu verwenden.

Die autonomen Schienenfahrzeuge sollen aus Massegründen über zwei einzelne Achsen mit einem Achsabstand von ca. 8 m und einer maximalen Achslast von 22,5 t (relevant für den Güterverkehr) verfügen. Dies ist nur nach EBO möglich, im Bereich der BOStrab ist eine maximale Achslast von ca. 10 t zulässig. Nach EBO beträgt die mögliche Gesamtmasse somit 45 t. Für autonome Schienenfahrzeuge im Personenverkehr werden für die Berechnungen ca. 25 t angesetzt.

Energiebedarf, Stromspeichermasse und Antriebsleistung

Basierend auf den geometrischen Angaben sowie der maximalen Fahrzeuggesamtmasse können für die jeweiligen möglichen Anwendungsfälle (Betriebsszenarien) grobe Energiebedarfsrechnungen durchgeführt werden. Den höchsten Energiebedarf haben dabei die Szenarien für den Fernverkehr und den Güterverkehr. Es ergibt sich hier ein Energiebedarf von rund 700 kWh. Werden Verluste und Alterungsprozesse mitberücksichtigt dann muss eine Energiemenge von ca. 1.000 kWh gespeichert und mitgeführt werden können. Zugrunde gelegt wird dabei eine Betriebszeit von vier Stunden in Beharrungsfahrt für den Fernverkehr und Güterverkehr. Zusätzlich sind im Fern- und Güterverkehr fünf Beschleunigungs- und Bremsvorgänge berücksichtigt. Für die Betrachtung des Commuterverkehrs werden für eine Betriebszeit von zwei Stunden

unter Beharrungsfahrt, und zusätzlichen zwei Stunden für Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sowie Wartezeiten für den Fahrgastwechsel. Die genannten 1.000 kWh entsprechen dem Stand der Technik nach einer Stromspeichermasse von rund 5 t. Zusätzlich muss eine notwendige Befestigungs- und Lüftungsstruktur bedacht werden. Das benötigte Volumen für den Stromspeicher liegt demnach bei ca. 3 m³. Hierbei ist nicht berücksichtigt, wie die einzelnen Zellen technisch konstruiert sind (elektrische Anschlüsse, Montagevorrichtung, etc.).

Basierend auf den Zahlenwerten für die Cargo-Schienenfahrzeuge (max. Masse) kann für den Antrieb eine Leistung von insgesamt etwa 700 kW berechnet werden. Dabei wird eine Beharrungsfahrt in maximaler Steigung zugrunde gelegt.

Betrieblicher Einsatz

Die im vorherigen Abschnitt angestellten Berechnungen zeigen, dass eine hinreichende Reichweite für die meisten Anwendungen (Fernverkehr und Nahverkehr) über große Distanzen ohne Tausch der Drive Unit bei einer verträglichen Stromspeichermasse realistisch ist. Im Cargo-Bereich kann aufgrund der hohen zu befördernden Massen bei einer hohen Anzahl von Brems- und Beschleunigungsvorgängen ein Tausch der Drive Unit notwendig werden. Hierfür müssen einerseits infrastruktureitige Voraussetzungen geschaffen werden, andererseits das Batterieset als Schnellwechseleinheit ausgeführt werden.

Im Personenverkehr ist ein Betrieb über mehrere Stunden ohne Nachladen möglich. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn ein autonomes Schienenfahrzeug in der Hauptverkehrszeit eingesetzt wird und viele Personen transportiert werden müssen. Den ersten Überlegungen nach ist ein Betrieb im Fernverkehr und Regionalverkehr am sinnvollsten. Hier können die Anforderungen des Reisenden am besten erfüllt werden. Dies wären z. B. Erhöhung des Reisekomforts durch Vermeidung von Umstiegen im Fernverkehr (Start-Ziel Verbindung) oder eine umsteigefreie Fahrt im Regionalverkehr aufgrund von bedarfsorientierten Fahrten. Im S-Bahnverkehr (Commuter) kann aufgrund der hohen Anzahl an zu befördernden Personen kein wesentlicher Vorteil der autonomen Schienenfahrzeuge ermittelt werden, da lange Züge mit einer hohen Platzdichte bei enger Taktzeit hier effizienter sind.

Für die Anwendung Light Rail (Straßen-/Stadtbahn) muss die Life-Unit an die Anforderungen der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab) angepasst werden. Eine EBO-konforme Life-Unit ist hier nicht für den Einsatz geeignet.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden die Potentiale autonom operierender kleiner Schienenfahrzeuge aufgezeigt. Dabei muss insbesondere darauf geachtet werden, dass die heutigen Hürden mit dem Zug zu fahren, mit dieser innovativen Art des Bahnbetriebs minimiert oder besser eliminiert werden. Autonomes Fahren stellt bei geeigneter Umsetzung eine Möglichkeit dar, den Modal Split hin zum Schienenverkehr zu verlagern.

Anschließend wurde ein Ansatz erläutert, mit dem die Anforderungen an das System Bahn systematisch erfasst und strukturiert werden können. Aufbauend auf dieser Anforderungsdatenbank wurden die groben Lösungsansätze, ausgehend von der initialen Automated Nano Transport System-Definition, an den Anforderungen gespiegelt. Dabei kann an der Spiegelung der Lösungen an den Anforderungen festgehalten werden. Beachtet werden muss dabei jedoch auf welchem Detaillierungsgrad sich die Lösungen und Anforderungen befinden.

In weiteren Untersuchungen sind die autonomen Schienenfahrzeuge des Automated Nano Transport Systems genauer zu spezifizieren bis hin zu einem vollständigen Lastenheft. Aufbauend auf einem Lastenheft kann ein konkretes Lösungskonzept erarbeitet werden, anhand dessen im Nachgang ein Prototyp entwickelt werden kann, um die Funktionsweise und Praxistauglichkeit des Systems zu validieren.

Literatur

- [1] LITMAN,T.: Autonomous Vehicle Implementation Predictions, Victoria, BC, Kanada, 2017.
<http://www.vtpi.org/avip.pdf>. Letzter Zugriff: 30.03.2017.
- [2] VDV E.V.: Positionspapier: Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge. Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen, Köln, 2015.
- [3] Society of Automotive Engineers (SAE): Automated Driving. Levels of driving automation are defined in new SAE International Standard J3016, 2014.
- [4] Schindler, C., Nießen, N., Vallée, D.: Assistierter, automatischer oder autonomer Betrieb - Potentiale für den Schienenverkehr, Eisenbahntechnische Rundschau, 04/2017, S. 32-37
- [5] Eßer, F.: Assistiertes, Automatisiertes und Autonomes Fahren ("3A") im Schienenverkehr, in: *Ingenieurspiegel*, 02/2017, S. 24-27,
- [6] Norta, M.: Ein Verkehrsmittelwahlmodell für den Personenverkehr auf Basis von Verkehrswiderständen, Aachen, 2012
- [7] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.H.: Methode QFD, in: *Konstruktionslehre*, S. 677-680, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003
- [8] Pahl, J.: Systemtechnik des Schienenverkehrs - Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, 8. Auflage., Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2016
- [9] EILMANN,S., BEHREND, F., HÜBNER, R., WEITLANDER, E.: Interessengruppen/Interessierte Parteien. In Kompetenzbasiertes Projektmanagement, Nürnberg, Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement, 2011, S. 71.

Autoren**Schlaht, Jürgen**

Abteilungsleiter Innovative Technologies bei Siemens Mobility Mainline Transport, Werner-von-Siemens-Straße 67, 91052 Erlangen

**Frink, Lukas**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen, Seffenter Weg 8, 52074 Aachen

**Laumen, Peter**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen

**Schütttert, Andreas**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen

**Schindler, Christian**

Universitätsprofessor, Leiter des Lehrstuhls und Instituts für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen, Seffenter Weg 8, 52074 Aachen

**Nießen, Nils**

Universitätsprofessor, Leiter des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen