



Next Generation Train BIT

MS 2370 1912

Betriebsszenario für eine geeignete Relation im deutschen Hochgeschwindigkeitsnetz ist erstellt

AP 2370





Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Verkehrssystemtechnik

Michael Mönsters

Tel.: 0531 – 295 3450

Michael.Moensters@dlr.de

Leander Flamm

Tel.: 0531 - 295 2674

Leander.Flamm@dlr.de

AP-Titel		Betriebsszenario für eine geeignete Relation im deutschen Hochgeschwindigkeitsnetz ist erstellt
Nummer MS		23701912
Thema MS		Betriebsszenario für eine geeignete Relation im deutschen Hochgeschwindigkeitsnetz ist erstellt
Schlüsselwörter		
Zugänglichkeit		
Autoren		Michael Mönsters, Leander Flamm
Mit Beiträgen von		
Version	Kommentar	Datum
1.0	Abgabeversion	15.01.2020
Dateiname		\\FK-AP9100\\Transfer\\Winter\\HiWi\\Berichte NGT III\\Meilensteinberichte\\MS_xxxxxxx_Titel.docx
Zuletzt gespeichert von		Mönsters, Michael
Zuletzt gespeichert am		24. Februar 2020
Geprüft durch:		Jakob Geischberger
Unterschrift:		
Freigegeben durch:		
Unterschrift:		
Gedruckt am		

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
2	Slip Coaching-Verfahren	5
2.1	Vorarbeiten in den bisherigen NGT-Projekten	5
2.2	Was ist Slip Coaching?	6
2.3	Untersuchungsbedarf	7
3	Betriebskonzept für das Slip Coaching	8
3.1	Fahrplankonzept	8
3.2	Auswahl Referenzstrecke	9
3.3	Fahrzeuganforderungen	9
3.4	Randbedingungen der Leit- und Sicherungstechnik	12
3.5	Fahrplan- und Linienkonzept	12
3.6	Stationsgestaltung/Fahrgastinformation	15
3.7	Vorbetrachtung	16
3.7.1	Vorab-Simulation	17
3.7.2	Vorteile Slip Coaching	18
3.7.3	Nachteile Slip Coaching	18
4	Zusammenfassung und Ausblick	21
5	Literatur	22
6	Abbildungsverzeichnis	27
7	Tabellenverzeichnis	28
8	Abkürzungsverzeichnis	29

1 Einführung

Die Betrachtung der betrieblichen Möglichkeiten des dynamischen Flügels im Projekt NGT 3 führte zur Definition einiger Szenarien, die insbesondere im Schienenpersonenfernverkehr höhere Sitzplatzkapazitäten ermöglichen. Dazu gehört z. B. die Verdopplung von Zugfahrten oder das Slip Coaching-Verfahren. Näher betrachtet wurde das Szenario zur Verdopplung von Zugfahrten auf einer stark belasteten Strecke unter Ausnutzung beider Gleise eines Mittelbahnsteigs, welches auf Basis des Tokaido-Shinkansen in Japan rechnerisch validiert wurde. In Deutschland ist die Streckenbelastung nicht so hoch wie in Japan. Hier ist die Untersuchung eines weiteren Szenarios des dynamischen Flügels aussichtsreich: das Slip Coaching, bei dem ein längerer Zugverband während der Fahrt geteilt wird. Hierdurch können die Langstrecken zwischen Nord- und Süd- oder Ost- und Westdeutschland kapazitätssparend schneller bedient werden. Der oder die hinteren Zugteile lassen sich vor kleineren Bahnhöfen (z. B. Fulda, Kassel, Göttingen) zurückfallen, um dort anzuhalten. Der vordere Zugteil fährt ohne Halt weiter und erreicht dadurch eine kürzere Fahrzeit. Beim Abfahren ist das gegensätzliche Verfahren denkbar: der an einem kleinen Bahnhof losfahrende Zug wird auf der Strecke von einem durchgehenden Zugteil „eingeholt“.

Das Ziel des Slip Coaching ist es, die Erreichbarkeit der Städte entlang der Strecke sowie der großen Knotenbahnhöfe zu verbessern. Das Konzept soll die Reisezeiten senken und die Abfahrtshäufigkeiten im Schienenpersonenfernverkehr erhöhen. Im vorliegenden Projekt sollen der erreichbare Nutzen und die Machbarkeit dieses Konzepts untersucht werden. Hier spielen insbesondere die Nachfragerelationen der Fahrgäste und das Linienkonzept eine Rolle. Die Untersuchung soll zunächst auf ein konkretes Szenario einer HGV-Strecke in Deutschland abzielen. Die Ergebnisse werden dann aber verallgemeinerbar beschrieben, sodass eine Anwendung auf andere Strecken im In- und Ausland möglich ist. Als Gradmesser für den Erfolg sollen die verbesserte Erreichbarkeit und Fahrzeit quantifiziert werden.

Im vorliegenden Meilenstein 2370 1912 wird zunächst ein Betriebsszenario für den Einsatz des Slip Coaching auf einem Referenzkorridor im deutschen Schienennetz erstellt. Die Ergebnisse aus diesem Meilenstein dienen als Grundlage für die folgenden Arbeiten, und zwar der Bewertung der Effekte (MS 2370 2012) sowie der Übertragung des Modells auf andere Anwendungsregionen und -länder (MS 2370 2112).

2 Slip Coaching-Verfahren

2.1 Vorarbeiten in den bisherigen NGT-Projekten

Seit 2007 arbeitet das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) an einem Konzept für einen Hochgeschwindigkeitszug (Next Generation Train - NGT). Der Fokus lag dabei zunächst auf der Konstruktion eines doppelstöckigen Hochgeschwindigkeitszugs für den Personenfernverkehr (NGT High Speed Train - HST). Darauf aufbauend wurde ein Zubringerzug entwickelt (NGT LINK), der mit geringeren Geschwindigkeiten verkehrt und Regionen abseits der Hauptstrecken an das NGT HST-Netz anbindet. Für den Schienengüterverkehr wird seit 2014 der NGT CARGO entwickelt. Neben der Definition und Erarbeitung der verschiedenen NGT-Versionen wurden parallel Forschungsarbeiten zu einzelnen Fragestellungen vorangetrieben, z. B. Fahrwerkstechnik, Aerodynamik, Betriebskonzepte, Antrieb, Fahrgastkomfort oder Leichtbau. Diese Arbeiten fließen in die verschiedenen NGT-Versionen ein und ergeben so das NGT-Gesamtkonzept.

Eine betriebliche Innovation des NGT stellt das Dynamische Flügeln dar. Diese betrieblich-technische Systemfunktion ermöglicht das virtuelle Kuppeln von Zügen und beinhaltet auch das Stärken und Schwächen von Zugverbänden während der Fahrt (also das Kuppeln bzw. Entkuppeln von zwei oder mehreren Zugteilen). Beim virtuell gekuppelten Zugverband besteht keine mechanische Verbindung mehr zwischen den einzelnen Triebzug-Einheiten. Die Einhaltung des Abstandes zwischen den Einheiten wird durch eine Regelungstechnik sichergestellt. Im DLR-Forschungsverbund lieferten mehrere Institute Inhalte zum Dynamischen Flügeln. Im Projekt NGT 2 wurde zunächst die potenzielle Machbarkeit untersucht. Hier wurden die Anforderungen an die Leit- und Sicherungstechnik definiert sowie eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt. Schließlich wurden die Forschungsarbeiten im Projekt NGT 3 im Hinblick auf die Aspekte Betriebsverfahren und Regelung, Relativortung, Kommunikation, Aerodynamik sowie Sensorik fortgeführt. So hat z. B. das Institut für Fahrzeugkonzepte (FK) das funktionale Konzept erstellt und erste Regelungsansätze beigetragen. Im Institut für Kommunikation und Navigation (KN) wurden Ansätze zur Ortung und Kommunikation erarbeitet. Im Institut für Verkehrssystemtechnik (TS) wurden Fragestellungen zur Leit- und Sicherungstechnik sowie zu möglichen betrieblichen Szenarien und Betriebskonzepten betrachtet [1-43].

Die Idee des Dynamischen Flügelns bietet zahlreiche Anwendungsszenarien, einige wurden bereits in NGT 3 betrachtet und untersucht. Die Betrachtung des Slip Coaching-Verfahrens im Rahmen des Projekts NGT BIT baut auf den Arbeiten aus den vorherigen NGT-Projekten auf. Das Slip Coaching soll als Anwendung des Dynamischen Flügelns intensiver betrachtet werden. Dabei soll ein vollständiges Betriebskonzept erstellt und die operative, fahrplantechnische Machbarkeit gezeigt werden.

Während der Einführung des Dynamischen Flügelns noch zahlreiche regulatorische Hürden entgegenstehen, nähert sich das technische Verfahren des Dynamischen Flügelns einem realisierbarem Zustand an [44]. Für die Einführung einer derartigen revolutionären Technologie werden konkrete Szenarien benötigt, die die Potenziale hervorheben und mögliche Migrationspfade aufzeigen. Als ein entscheidendes Hindernis bei der Durchführung des Dynamischen Flügelns hat sich die Aufteilung eines virtuell gekuppelten Zuges vor einer herkömmlichen Weiche gezeigt. Hier muss der Abstand zur vorausfahrenden Triebzug-Einheit im Zulauf auf die Weiche mindestens den absoluten

Bremswegabstand zum Gefahrpunkt (Weiche) betragen, sodass die Vorteile des Dynamischen Flügelns teilweise verloren gehen. Überlegungen, anstatt einer herkömmlichen Weiche eine passive Weiche zu verwenden, sind noch Gegenstand der Forschung.

In diesem Arbeitspaket wird nun ein Betriebskonzept für Hochgeschwindigkeitszüge erarbeitet, welches die Nutzung der Vorteile des Dynamischen Flügelns (höhere Streckenkapazität und Stärken/Schwächen von Zügen bei voller Fahrt) auch auf bestehender Infrastruktur ermöglicht. Lediglich die Leit- und Sicherungstechnik muss gegenüber dem derzeitigen Stand angepasst werden, damit das virtuell gekoppelte Fahren mit geringeren Abständen zwischen den Einheiten möglich wird. Das Slip Coaching-Verfahren soll hier als Anwendungsszenario gezeigt werden, welches auf bestehender Infrastruktur umsetzbar wäre, ohne auf die speziellen, auf mittlere Sicht noch nicht verfügbaren Passiv-Weichen angewiesen zu sein.

2.2 Was ist Slip Coaching?

Das ursprüngliche Slip Coaching-Verfahren stammt aus dem britischen Bahnbetrieb des 19. und 20. Jahrhunderts. Erste Versuche erfolgten ab 1858, nach dem Ersten Weltkrieg etablierte sich das Verfahren als Standardprozess im Bahnbetrieb im Vereinigten Königreich [45]. Beim traditionellen Slip Coaching werden einzelne Wagen am Zugende während der Fahrt vom Zugverband getrennt und stoppen dann am nächsten Zwischenbahnhof. Von London kommende Eilzüge ließen zur Bedienung kleinerer Zwischenhalte einzelne Wagen während der Fahrt zurückfallen, indem ein auf dem jeweiligen Wagen anwesender und entsprechend ausgebildeter Schaffner den Wagen abkuppelte und dann eine mechanische Bremse betätigte. Manuell wurde der Wagen so innerhalb des angesteuerten Bahnhofs auf dem Hauptgleis, das der Eilzug kurz zuvor durchfahren hatte, zum Stehen gebracht. Eine separate Lok übernahm den Wagen und schob ihn an ein Bahnsteiggleis oder zog ihn alternativ auf einer Stichstrecke zu einem weiteren Zielbahnhof. Der restliche Zugverband setzte seine Fahrt mit unveränderter Geschwindigkeit fort. Das Betriebsverfahren wurde bis 1960 beibehalten [46]. Das System konnte sich langfristig nicht durchsetzen, da neben dem hohen Arbeitsaufwand und der fragwürdigen Sicherheit während des Bremsvorganges das Konzept nicht umgekehrt angewendet werden konnte. Somit mussten für die Rückfahrt nach London doch wieder alle Wagen einzeln eingesammelt, angekuppelt und mit Halt an jeder Station zurückbefördert werden.

Die historische Idee des Slip Coaching bekommt nun durch Einsatz moderner Leit- und Sicherungstechnik sowie der Verwendung neuartiger Kommunikation, Ortung und Sensorik eine neue Dimension. In diesem Projekt wird die alte Idee des Slip Coaching aufgegriffen und in ein zukünftiges, zeitgemäßes Konzept überführt. Kombiniert mit der Funktion des Dynamischen Flügelns könnte das Slip Coaching-Verfahren in verbesserter Form wieder eingeführt werden.

Der betriebliche Ablauf beim Slip Coaching könnte wie folgt aussehen. Zugverbände aus mehreren kurzen, untereinander virtuell gekuppelten Einheiten fahren von einem größeren Knotenbahnhof aus gemeinsam und sicherungstechnisch als ein Zug los. Einige Kilometer vor Zwischenbahnhöfen wird die jeweils letzte Einheit (oder nach Bedarf auch mehrere) aus der virtuellen Kupplung gelöst

und lässt sich zurückfallen, bis am Bahnsteig des durchgehenden Hauptgleises gehalten wird. Nach dem Fahrgastwechsel beschleunigt die Einheit erneut und rechtzeitig, sodass ein folgender durchgehender Zugverband die Einheit einholt und schlussendlich mit einer neuen virtuellen Kupplung verbindet. Dieses Prozedere kann so oft wiederholt werden, wie Einheiten im Zug vorhanden sind, da Einheiten nach einem Halt an der Zugspitze stehen und nicht erneut halten können, ohne den durchgehenden Zug ebenfalls zum Halt zu zwingen. Daher ist nach drei bis vier Zwischenhalten ein Halt des gesamten Zugverbands vorzusehen, bei dem die Reihenfolge der Einheiten nach Bedarf geändert werden kann. Durch das virtuelle Kuppeln kann auch diese Aufteilung auf zwei Gleise und das nachfolgende erneute Zusammenführen beschleunigt stattfinden.

2.3 Untersuchungsbedarf

Im Rahmen dieses Projekts ist geplant, das Slip Coaching-Verfahren exemplarisch anhand einer Referenzrelation auf dem deutschen Schienennetz zu untersuchen. Die Auswahl für Deutschland als Untersuchungsraum erfolgte aus mehreren Gründen. Einerseits steigen die Fahrgastzahlen im Schienenpersonenfernverkehr seit einigen Jahren an [47]. Andererseits treffen stärker ausgelastete Züge auf eine nur begrenzt verfügbare Infrastruktur, welche nicht in gleichem Maße mitwachsen kann. Um dem Fahrgastanstieg zu begegnen, sind mehr Fahrzeuge und damit mehr Fahrplantrassen erforderlich. Dies erfordert umfangreiche Infrastrukturausbauten. Das Slip Coaching wäre eine Lösung, um ohne großen Infrastrukturausbau und Trassen sparend deutliche Sitzplatzzuwächse zu realisieren. Zusätzlich könnten durch das Slip Coaching die Reisezeiten gesenkt und betrieblich stabile Direktverbindungen geschaffen werden. Darüber hinaus könnte das Konzept eine große Rolle beim Vorhaben der Bundesregierung spielen, das Fahrgastaufkommen bis 2030 im deutschen Schienenpersonenfernverkehr zu verdoppeln [48]. Die Bundesregierung geht davon aus, dass dafür umfassende Infrastrukturausbauten notwendig sind [49]. Das Slip Coaching könnte diese Ausbauprojekte deutlich reduzieren. Unter der Annahme, dass die Leit- und Sicherungstechnik in Zukunft dynamisches Flügeln ermöglicht, wäre somit ein höheres Sitzplatzangebot umsetzbar. Auch das Konzept des Deutschland-Takts profitiert vom Slip Coaching [50]. Fahrzeitreduzierungen könnten dazu genutzt werden, ITF-Knoten noch rechtzeitig zu erreichen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die veränderte Lage bei der Durchführung von Großprojekten in Deutschland. Die Umsetzung großer Infrastrukturprojekte wie bspw. Schienenausbauprojekte ist in den letzten Jahren sehr komplex geworden. Aspekte wie hohe Investitionen, lange Planungszeiten, eine zunehmende Zahl an Bauvorschriften und Ausgleichsmaßnahmen, die Bürgerbeteiligung sowie die Verfügbarkeit der Bauindustrie und von Fachkräften spielen dabei eine große Rolle. Das Slip Coaching kann hier eine Alternative aufzeigen, in die Digitalisierung des Bahnbetriebs zu investieren und die Investitionen in den Infrastrukturausbau zu senken, ohne die Ziele wie Fahrgastwachstum und Kapazitätserhöhung aufzugeben.

3 Betriebskonzept für das Slip Coaching

3.1 Fahrplankonzept

Das Fahrplankonzept für das Slip Coaching-Verfahren ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Der Zweck der gezeigten „local line“ wird in Abschnitt 3.5 erläutert.

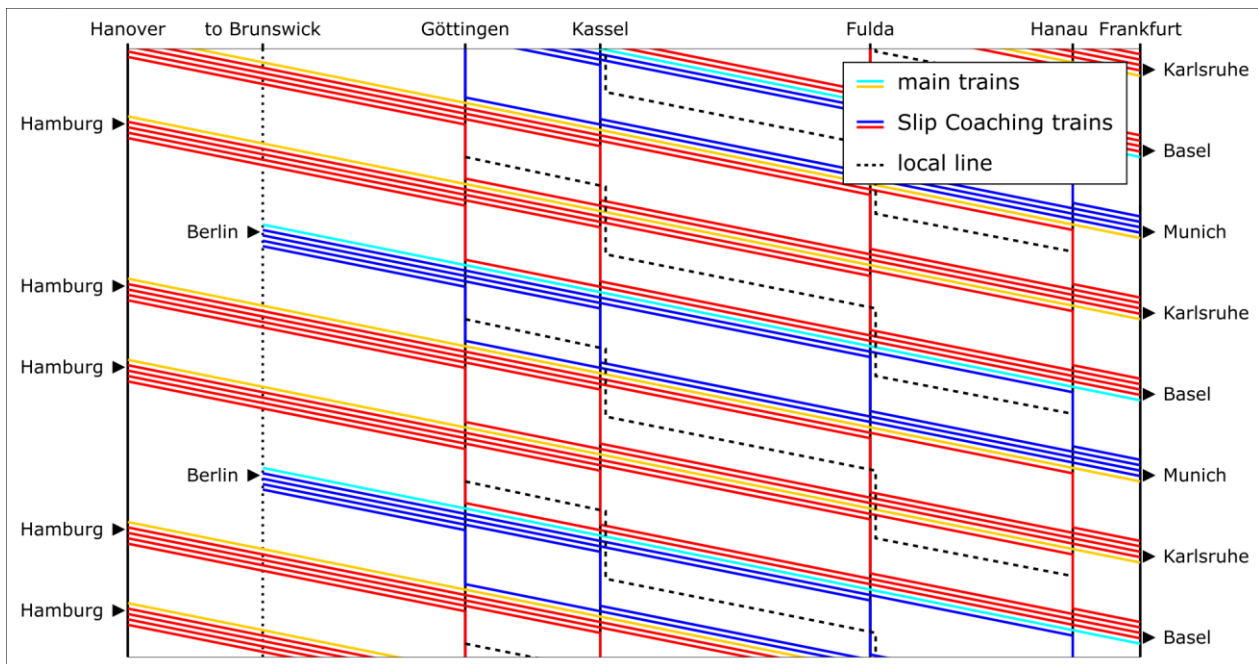


Abbildung 1: Grundkonzept des Fahrplans

Die Länge der einzelnen Einheiten ist nicht prinzipiell beschränkt, es hat sich aber eine Länge von zwei bis vier Wagen als betrieblich sinnvoll herausgestellt (siehe hierzu auch Abschnitt 3.3). Zwischen den Einheiten muss ein geschwindigkeitsabhängiger Abstand eingehalten werden (ebenfalls Abschnitt 3.3). Hierdurch variiert die Länge des gesamten Zugverbands zwischen 400 m im Stillstand und bis zu 1,1 km bei der Fahrt mit hoher Geschwindigkeit.

Die Grundidee wird im Folgenden in zwei Szenarien untersucht:

- Das Szenario „VC single“ geht von einer Zugkonfiguration von maximal 400 m im Stillstand aus. Hierfür müssten Einheiten teilweise als zweiteilige Triebwagen umgesetzt werden um das Konzept zu verwirklichen, was wirtschaftliche und fahrzeugtechnische Fragen aufwirft.
- Daher wird parallel im Szenario „VC double“ untersucht, ob eine Zugkonfiguration von 700 m im Stillstand ebenfalls denkbar wäre, wobei sich der Zugverband vor Knotenbahnhöfen, an denen alle Einheiten halten, in zwei Teile à 300 bzw. 400 m auftrennt, um parallel an zwei Bahnsteigkanten zu halten. In diesem Fall müssten die kleinsten Einheiten vierteilig ausgeführt werden, was bereits im europäischen Hochgeschwindigkeitsverkehr praktiziert wird [51, 52].

3.2 Auswahl Referenzstrecke

Für die Untersuchung des Slip Coaching-Verfahrens wurde die Strecke Hannover/Braunschweig – Göttingen – Kassel – Fulda – Hanau – Frankfurt (Main) gewählt.

Mehrere Kriterien waren hierfür ausschlaggebend:

- Die Abfolge mehrerer kleinerer Bahnhöfe, die aber eine regelmäßige Anbindung rechtfertigen (Göttingen, Kassel, Fulda und Hanau), zwischen zwei großen Knoten (Hannover und Frankfurt)
- Eine größtenteils separierte Infrastruktur für den Fernverkehr
- Eine Höchstgeschwindigkeit der Infrastruktur von mindestens 250 km/h, um sinnvollen Hochgeschwindigkeitsverkehr untersuchen zu können
- Eine Verzweigung an einem Streckenende (Göttingen – Braunschweig), durch die die Möglichkeit neuer Direktverbindungen demonstriert werden kann

Zusätzlich zum heutigen Zustand der Strecke wurde die bereits in fortgeschrittener Planung befindliche Neubaustrecke (Hanau –) Gelnhausen – Fulda einbezogen, wodurch ein weitestgehend separater Hochgeschwindigkeitskorridor auf der gesamten Strecke entsteht.

Als Knotenbahnhöfe, an denen alle Züge halten, wurden Hannover, Braunschweig und Frankfurt gewählt. Die Zwischenstationen werden mit dem Slip Coaching-Verfahren jeweils von Zugteilen bedient, wodurch aber ebenfalls jeder durchgehende Zug von jeder Zwischenstation erreicht wird. An den Zwischenstationen wird nur eine Bahnsteigkante je Richtung angenommen, obwohl teilweise weitere Bahnsteigkanten über Weichenverbindungen mit geringer Geschwindigkeit erreichbar wären. Diese sollen aber vom Grundkonzept explizit nicht genutzt werden, auch um die Problematik einer umlaufenden Weiche zwischen zwei Zugteilen zu umgehen. Alle Bahnsteige haben eine Länge von 400 m.

Für die mikroskopische Simulation wird der Abschnitt zwischen (einschließlich) Göttingen und Kassel betrachtet und detailliert aufgenommen. Dieser Abschnitt weist alle topografischen Besonderheiten der Strecke (Steigungen, Tunnel, vergleichsweise langsame Bahnhofseinfahrten) auf und kann so für eine repräsentative Untersuchung genutzt werden. Durch die Simulation von zwei Bahnhöfen können valide Aussagen über die zeitlichen Abläufe eines Slip Coaching-Manövers getroffen werden.

3.3 Fahrzeuganforderungen

Im heutigen Betriebskonzept kommen im Schienenpersonenfernverkehr auf der Strecke Hannover – Frankfurt zumeist ICE-Züge mit einer Höchstgeschwindigkeit von bis zu 280 km/h zum Einsatz. Dabei handelt es sich um Vollzüge (ICE 1, BR 401 bzw. ICE 4, BR 412) oder um zwei mechanisch miteinander gekuppelte Halbzüge (ICE 2, BR 402 bzw. ICE-T, BR 411). Die Kompositionen weisen in der Regel eine Gesamtlänge von ca. 400 m auf. In Verbindung mit dem dynamischen Flügeln sind für das Slip Coaching-Verfahren abweichende Fahrzeuge, Fahrzeugausrüstungen sowie Fahrzeugzu-

sammenstellungen erforderlich. Bislang ist eine mechanische Kupplung von einzelnen Zugteilen vorzufinden, in Zukunft ist das virtuelle Kuppeln von einzelnen Triebzug-Einheiten mit unterschiedlicher Wagenanzahl geplant. In diesem Abschnitt sollen die Fahrzeuganforderungen dargestellt werden, welche nötig sind, um das Slip Coaching-Verfahren umsetzen zu können.

Für das Slip Coaching-Fahrzeug waren verschiedene Ideen in der Diskussion. Eine erste Möglichkeit stellte die Orientierung am vorhandenen Fahrzeugmaterial dar. Dabei werden die vorhandenen ICE-Züge technisch so aufgerüstet, dass sie für ein Slip Coaching-Betriebskonzept weiterverwendet werden können. Dazu zählt bspw. die Ausstattung mit neuer Leit- und Sicherungstechnik, welche das Fahren mit dynamischem Flügeln erlaubt. Ein Vorteil wäre die schnelle Verfügbarkeit der Fahrzeuge. Die Gefäßgrößen und Fahrzeughöchstgeschwindigkeiten sprächen ebenfalls für eine Nutzung vorhandener ICE-Züge. Mögliche Risiken wären allerdings fehlende Züge für den laufenden Betrieb aufgrund der Umrüstung sowie Unwägbarkeiten bei Umbauten an existierenden Fahrzeugsystemen. Eine alternative Möglichkeit ist die Nutzung der bisherigen, im NGT-Projekt erarbeiteten Fahrzeugkonzepte wie NGT LINK oder NGT HST: Der NGT LINK weist als Zubringer zum NGT HST lediglich eine Höchstgeschwindigkeit von 230 km/h auf. Für das Slip Coaching Konzept auf der Strecke Hannover – Fulda – Frankfurt sind allerdings Höchstgeschwindigkeiten von 250 bis 280 km/h optimal, da die Strecke eine Maximalgeschwindigkeit von bis zu 280 km/h ermöglicht. Es ist generell eine hohe Streckengeschwindigkeit anzustreben, damit die Vorteile des Durchfahrens genutzt werden können. Die Verwendung des NGT HST wurde ebenfalls verworfen, da diese Konfiguration mit einer maximalen Geschwindigkeit von 400 km/h überspezifiziert wäre. Sinnvoll erscheint dagegen die Nutzung eines modifizierten NGT HST mit einer angepassten Höchstgeschwindigkeit von 280-300 km/h (Designentwurf für NGT HST 400, s. Abbildung 2).



Abbildung 2: NGT HST, Quelle: DLR

Beim Slip Coaching besteht der Zugverband in der Regel aus deutlich mehr als zwei Halbzügen, denn es können drei oder mehr Einheiten virtuell miteinander gekuppelt sein. Dazu ist es notwendig, die ursprüngliche NGT HST-Zuglänge (ca. 200 m) auf ein geringeres Maß zu reduzieren, um kleinere Einheiten einsetzen zu können. Dementsprechend sind NGT HST-Triebzüge mit zwei, drei oder vier Wagen vorgesehen. Die Basiskonfiguration besteht aus zwei Wagen mit einer Triebzuglänge von ca. 50 bis 60 m. Des Weiteren sind Triebzüge mit acht Wagen geplant. Als längster, einzelner Triebzug soll eine Einheit mit zwölf Wagen eingesetzt werden (Länge ca. 300 m). Die Standardlänge eines virtuell gekuppelten Zugverbands beträgt ca. 400 m und würde damit auf dem Niveau heutiger ICE-Züge liegen (s. Abbildung 3). Ein Grund dafür ist unter anderem die Orientierung an bestehenden Bahnsteiglängen entlang der Strecke. Der Einsatz der NGT HST bringt eine Reihe von Innovationen und Vorteilen mit sich, bspw. der Verzicht auf Führerstände aufgrund automatischen Betriebs, eine höhere Sitzplatzzahl aufgrund zweier Ebenen oder aerodynamische Verbesserungen gegenüber konventionellen Zügen [53].

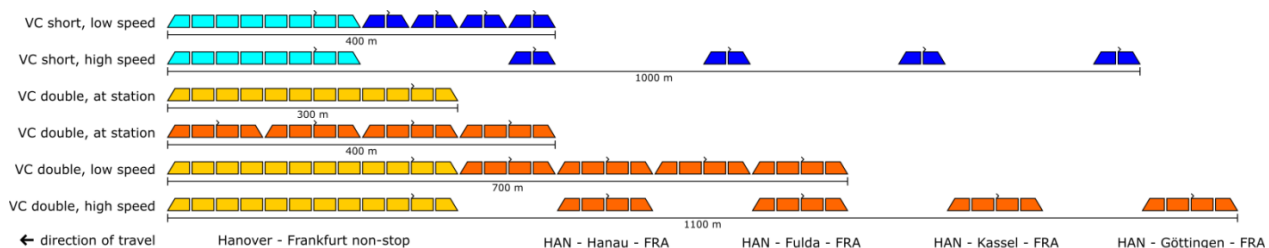


Abbildung 3: Mögliche Konfigurationen der Zugverbände beim Slip Coaching

Einen wichtigen Aspekt bei den Fahrzeuganforderungen stellt darüber hinaus das Thema Stromabnehmer dar. Betriebliche Richtlinien schreiben vor, dass sich Stromabnehmer bei Geschwindigkeiten von über 160 km/h in einem Abstand von mindestens 200 m zueinander befinden müssen [54]. Dies wird damit begründet, dass Schwingungen in der Oberleitung vermieden werden sollen, da es ansonsten zu Beschädigungen von Fahrleitung und Stromabnehmer kommen könnte. Bei fest gekuppelten Einheiten wird deshalb darauf geachtet, dass sich die Stromabnehmer der jeweiligen Triebzüge in ausreichendem Abstand zueinander befinden. Beim Slip Coaching sind nun allerdings zwei weitere Aspekte zu betrachten. Einerseits befinden sich im virtuell gekuppelten Gesamtverband mehr Stromabnehmer als beim herkömmlichen Zug. Andererseits ist der Abstand zwischen den einzelnen Triebzug-Einheiten aufgrund der virtuellen Kupplung sehr gering. Somit würde der Stromabnehmer-Mindestabstand von 200 m nicht eingehalten. Eine Durchleitung der Fahrdrabtspannung durch den Gesamtverband und damit eine Minimierung der Anzahl an gehobenen Stromabnehmern ist aufgrund der virtuellen Kupplung nicht möglich. Die Anzahl an aktiven Stromabnehmern kann also nicht reduziert werden. Deshalb ist eine Regelung erforderlich, welche je nach Geschwindigkeit die Abstände zwischen den einzelnen Einheiten überwacht und den zum gegebenen Zeit-

punkt notwendigen Abstand einstellt. Als Beispiel sei hier ein Gesamtverband aus einem NGT HST Langzug mit zwölf Wagen sowie vier Einheiten mit je vier Wagen genannt (s. Abbildung 3). Im Bereich von Geschwindigkeiten bis 160 km/h beträgt die Länge des Gesamtverbands ca. 700 m plus Sicherheitsabstände. Daher wird der Betrieb im Bereich von stark belasteten Zulaufstrecken sowie im direkten Bahnhofsbereich großer Knoten aufgrund der Stromabnehmer-Thematik nicht behindert. Bei hohen Geschwindigkeiten kann die Ausdehnung des Gesamtverbands allerdings bis zu 1100 m betragen, um die Stromabnehmer-Restriktion einzuhalten. Dabei wird z. B. ein Fahrzeugabstand von jeweils 100 m gewählt, sodass sich die Stromabnehmer, welche z. B. mittig auf den Fahrzeugen angeordnet sind, in einer Distanz von mindestens 200 m zueinander befinden. Bei einer virtuell gekuppelten Fahrt mit geringen Abständen zwischen den einzelnen Fahrzeugen ist eine aerodynamisch günstige Kopfform wichtig. Hier kann der NGT HST seine Vorteile in der Aerodynamik nutzen.

3.4 Randbedingungen der Leit- und Sicherungstechnik

Um das Slip Coaching-Betriebskonzept umsetzen zu können, sind umfangreiche Anpassungen an der Leit- und Sicherungstechnik erforderlich, sowohl im Bereich der Infrastruktur (Strecke, Stellwerk) als auch auf der Fahrzeugseite. Als technologische Basis kann ETCS Level 3 verwendet werden. Allerdings sind Ergänzungen notwendig, damit das virtuelle Kuppeln sowie dynamische Flügel genutzt werden kann. Im Rahmen der vorherigen Projekten NGT 2 und NGT 3 sind dazu bereits umfangreiche Betrachtungen erfolgt [1, 13, 55]. Dabei wurde auch ein spezielles Zugsicherungssystem für das dynamische Flügel definiert (VCTCS – Virtual Coupling Train Control System). Eine weitere Voraussetzung für den Slip Coaching-Betrieb ist der Umstieg von manuell bzw. halbautomatisch gesteuerten Zügen auf vollautomatischen Betrieb, weil die Manöver virtuelles Kuppeln und dynamisches Flügel vermutlich nicht mehr durch Triebfahrzeugführer ausgeführt werden können. Die verschiedenen Fahrmodi wie sich zurückfallen lassen, sich wieder aufnehmen lassen, Zugverbände virtuell kuppeln etc. erfordern ein hohes Maß an zeitlicher und räumlicher Präzision bei gleichzeitig hohen Geschwindigkeiten.

3.5 Fahrplan- und Linienkonzept

Es werden zwei Linienverläufe unterstellt (Knotenbahnhöfe sind unterstrichen):

- Linie 1: Hamburg – Hannover – Göttingen – Kassel – Fulda – Hanau – Frankfurt – Mannheim – Stuttgart – München
- Linie 2: Berlin – Braunschweig – Hildesheim – Göttingen – Kassel – Fulda – Frankfurt – Mannheim – Karlsruhe – Basel

Auf Linie 1 werden dabei doppelt so viele Fahrten wie auf Linie 2 unterstellt, was dem derzeitigen Fahrtenangebot entspricht (s. Abbildung 4). Slip Coaches, die an einer Zwischenstation halten, haben einen Aufenthalt von ca. 6 min, wodurch ein 10 min später folgender Zug den Zugteil wieder

aufnehmen kann. Die 6 min Haltezeit sollten nicht vollständig als Fahrgastwechselzeit kommuniziert werden, sondern bereits nach 2 min laut Fahrplan beendet sein. Dadurch können verlängerte Haltezeiten durch sperriges Gepäck, Fahrradbeförderung, mobilitätseingeschränkte Personen etc. abfangen und ein resilienter Betrieb gewährleistet werden.

Durch das Slip Coaching entsteht eine neue Umsteigesystematik, die eine Verknüpfung der beiden Linienstränge ohne Umstieg des Fahrgastes ermöglicht. Wird ein Zugteil an einem Zwischenbahnhof für einen Halt abgekuppelt, wird er danach vom folgenden durchgehenden Zug wieder aufgenommen, wodurch ein anderer Zuglauf am Ende des Slip Coaching-Korridors erreicht wird. Somit können von einem Zug am Startbahnhof (z. B. Hannover) zwei unterschiedliche Züge am Endbahnhof (z. B. Frankfurt) für die Weiterfahrt erreicht werden, ohne dass ein physischer Umstieg notwendig ist. In einem Fall wird lediglich einmal an einer Zwischenstation gehalten, wohingegen im anderen Fall der durchgehende Zug gewählt wird.



Abbildung 4: Liniennetz des Betrachtungsraums

Zusätzlich verkehren im Betrachtungsraum – jedoch ohne Slip Coaching – zwei konventionelle Fernverkehrslinien:

- Linie A: Bremen – Hannover – Göttingen – Kassel – Fulda – Würzburg – Nürnberg – Ingolstadt – München
- Linie 12: Hildesheim – Göttingen – Kassel – Fulda – Hanau

Bei Linie A handelt es sich um eine bestehende ICE-Linie, die zwischen den Slip Coaching-Grundlinien weiterhin ungestört verkehren muss. Dies stellt eine Herausforderung an die Fahrplangestaltung dar. Linie 12 gehört dagegen prinzipiell zum Slip Coaching-Konzept. Sie ermöglicht die Verbindung der im Slip Coaching-Verfahren bedienten Zwischenstationen untereinander. Da diese durch die direkten Züge nur noch an die nächsten Knotenbahnhöfe angebunden werden, zu diesen allerdings eine Non-Stop-Verbindung erhalten, muss ein zusätzlicher Verkehr eingerichtet werden. Es ist hierbei von Vorteil, dass die Züge der Linie 12 nicht bis in die Knoten durchgebunden werden müssen, was dort Kapazitäten freihält. Außerdem können die eingesetzten Fahrzeuge an die geringere Nachfrage zwischen den kleineren Stationen angepasst werden und so wirtschaftlicher betrieben werden.

Das Linienkonzept kann sowohl mit einem 60 min- als auch mit einem 30 min-Takt je Linie realisiert werden, wodurch sich ein 20- bzw. 10 min Takt auf dem Slip Coaching-Korridor ergibt.

3.6 Stationsgestaltung/Fahrgastinformation

Die Fahrgastinformation und -lenkung muss für das vorgeschlagene Konzept stark angepasst und verbessert werden, da die Auswirkungen falscher Entscheidungen seitens der Fahrgäste gravierendere Auswirkungen haben. So kann es passieren, dass ein Zugteil am selben Gleis in Hannover nicht bereits in Göttingen, sondern erst in Hanau hält. Ein Zug auf der anderen Bahnsteigseite könnte direkt bis Frankfurt durchfahren. Korrekturen durch ein Aussteigen am nächsten Halt sind somit nicht mehr möglich. Das grundsätzliche Problem lässt sich bereits heute an ICE Sprinter-Verbindungen beobachten, wo es häufig zu Verwechslungen mit einem überall haltenden Zug kommt und Fahrgäste große Umwege fahren müssen und dadurch starke Fahrzeitverlängerungen erleiden. Durch die geringe Anzahl solcher Sprinterverbindungen ist das Problem momentan noch durch aufmerksames Personal und zusätzliche Durchsagen halbwegs beherrschbar.

Neben einer eindeutigen Fahrgastlenkung, beispielsweise über farblich markierte Bahnsteigabschnitte, ist eine offensichtliche Information über das Fahrtziel eines konkreten Wagens notwendig. Dies könnte über Anzeigen an den Türen oder über regelmäßige Bildschirme am Bahnsteig erfolgen, die mindestens je Wagen eindeutig zuzuordnen sind. In Italien bestehen entsprechende Konzepte bereits (siehe Abbildung 5).

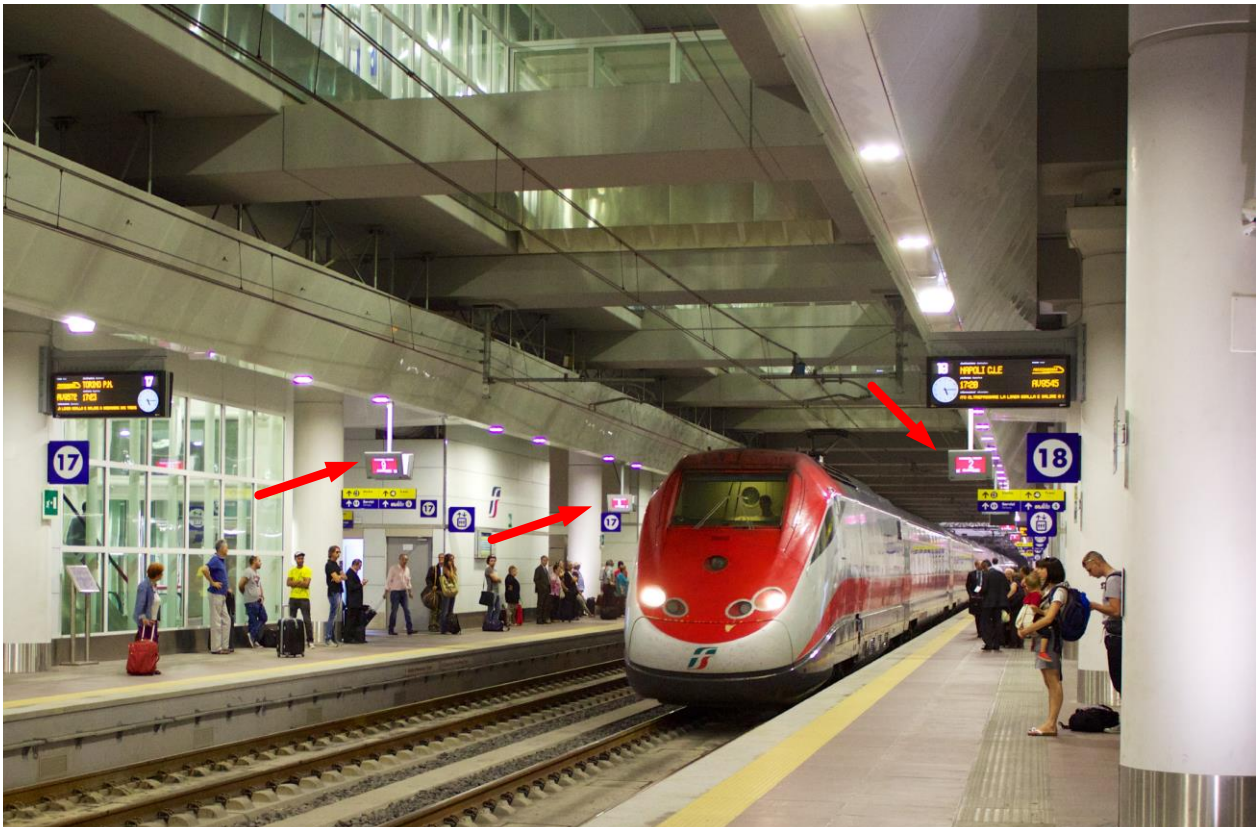


Abbildung 5: Bildschirme am Bahnhof Bologna Centrale (siehe rote Pfeile), bearbeitet, Incola, Wikimedia Commons, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en> [60]

Ebenfalls ist eine exaktere Information über digitale Schnittstellen, zum Beispiel die Fahrplan-App, hilfreich. Hier kann ein Wagenstandsanzeiger passend zur farblichen Markierung des Bahnsteigs angezeigt werden, die bereits beim Betreten des Bahnhofs eine Orientierung an entsprechenden Wegweisern ermöglicht (s. Abbildung 5).

3.7 Vorbetrachtung

Zur Abschätzung der Potenziale erfolgte eine Vorbetrachtung des Konzepts. Diese beinhaltete qualitative Analysen, eine stichprobenartige Untersuchung der Bahnsteigkapazitäten in Hannover Hbf, sowie eine vereinfachte mikroskopische Simulation des Betriebsablaufs zwischen Göttingen und Hannover.

Im folgenden Abschnitt wird die Vorab-Simulation erläutert. Die ermittelten qualitativen Vor- und Nachteile werden in den Abschnitten 3.7.2 und 3.7.3 beschrieben.

3.7.1 Vorab-Simulation

Für die Vorab-Simulation wurde eine Rechnung mit einer vereinfachten Fahrdynamik (vergleichbar zur Leistungscharakteristik eines ICE 4) auf einer ebenen Strecke ohne Geschwindigkeitsbeschränkung mit Halteabständen entsprechend der Referenzstrecke mikroskopisch simuliert. Hiermit konnte gezeigt werden, dass die grundsätzliche Systematik betrieblich durchführbar ist und zwischen den Slip Coaching-Zugverbänden noch genügend Raum für weitere Linien besteht.

Ein Ausschnitt aus dem Zeit-Weg-Diagramm der simulierten Zugfahrten ist in Abbildung 6 zu sehen. Neben dem Bündel des Slip Coaching-Zugverbands (durchfahrender Zugteil in rot, haltende Zugteile in schwarz) sind ein Zug der konventionell betriebenen Linie A (grün) sowie ein Zug der Lokallinie 12 (blau) zwischen den Bahnhöfen Göttingen und Kassel dargestellt. Die Einfahrt der beiden separaten Linien erfolgt an den Bahnhöfen auf separaten Gleisen, während die Slip Coaching-Züge auf den durchgehenden Hauptgleisen verkehren.

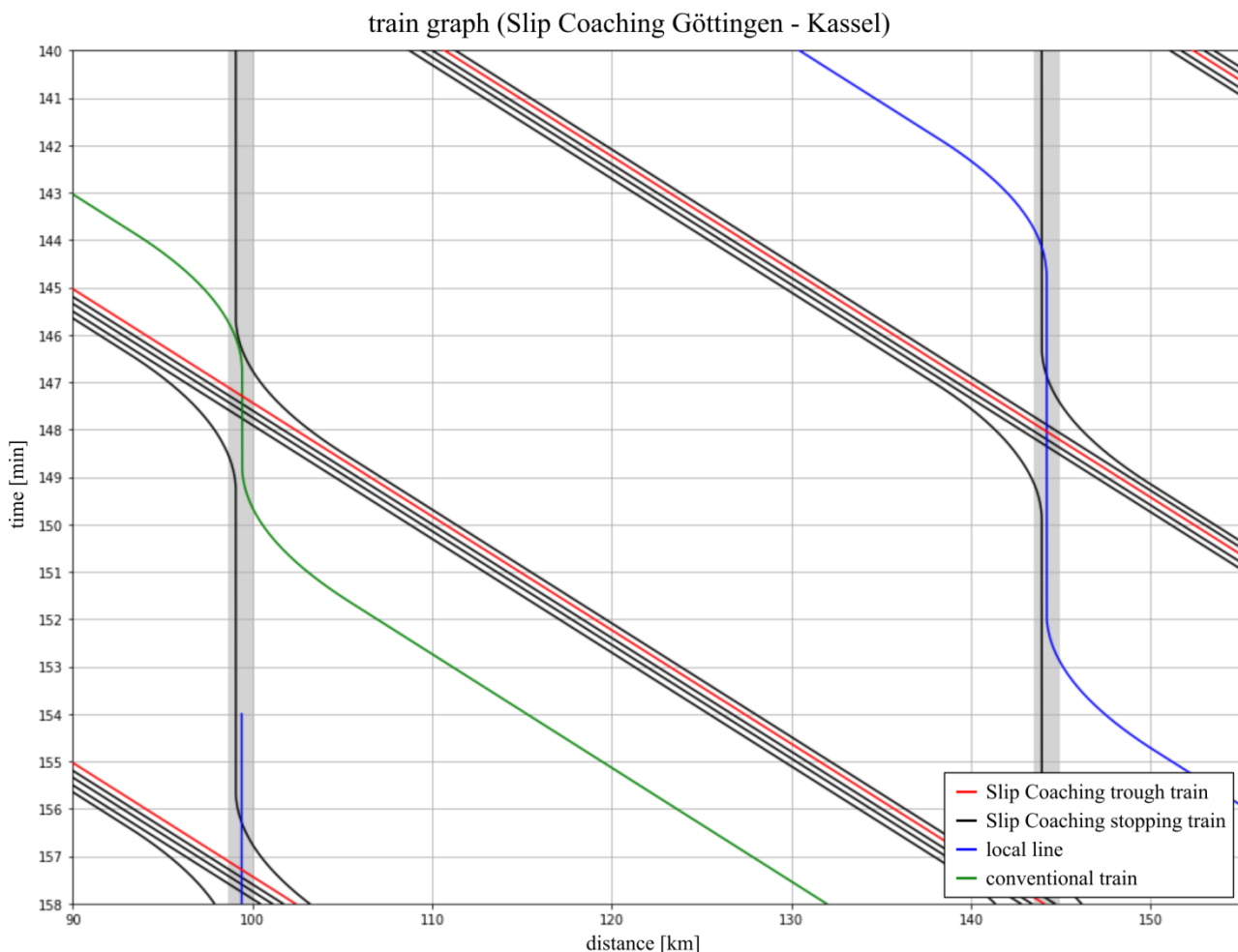


Abbildung 6: Zeit-Weg-Linie aus der vereinfachten Vorsimulation zwischen Göttingen und Kassel

Um die Qualität der betrieblichen Durchführung bewerten zu können sowie um detailliertere Angaben zu Energieverbräuchen und Zugfolgezeiten machen zu können, wird im weiteren Verlauf des

Projekts eine exakte Simulation durchgeführt. Hierfür werden sowohl die Zugdaten mit größerer Genauigkeit aufgenommen als auch die reale Strecke abgebildet.

3.7.2 Vorteile Slip Coaching

Einige Vorteile des Grundkonzepts können auch ohne mikroskopische Simulation bereits qualitativ genannt werden. Die Liste ist nicht vollständig und wird ggf. noch um zusätzliche Erkenntnisse im weiteren Projektverlauf erweitert. Alle Vorteile können ohne einen Neubau von Infrastruktur genutzt werden, was vergleichsweise kurzfristige Umsetzungszeiträume ermöglicht und die Aufwände im Vergleich zu Neubaustrecken beherrschbar hält.

- Es können kürzere Fahrzeiten sowohl zwischen den Knotenbahnhöfen als auch von den Zwischenstationen zu den Knotenbahnhöfen erzielt werden, da Fahrten ohne Zwischenhalt angeboten werden. Die Zwischenstationen untereinander werden gleichwertig zum heutigen Zugangebot miteinander verbunden.
- Die Streckenkapazität und auch die Knotenkapazität können erhöht werden, indem Züge als Zugverband verkehren und bei bestehender Bahnsteiginfrastruktur ihre Länge verdoppeln können.
- Es werden neue umsteigefreie Verbindungen angeboten. Von jedem Zug am Anfangsbahnhof aus sind zwei unterschiedliche Ziele erreichbar, da Zugteile entweder im selben Zug verbleiben oder durch einen Halt zum folgenden Zug wechseln.
- Durch verlängerte Haltezeiten an den Zwischenbahnhöfen kommt es zu weniger Verspätungen durch erhöhtes Fahrgastaufkommen.

3.7.3 Nachteile Slip Coaching

Neben den oben aufgeführten Vorteilen sind auch die Nachteile des Slip Coaching zu diskutieren. Aus Fahrgastsicht ist es nicht möglich, wie bisher während der Fahrt in einen anderen Wagen des Zuges zu wechseln. Des Weiteren kann beim Halt am Bahnhof nicht in eine andere Triebzug-Einheit desselben Zuges umgestiegen werden, da immer nur ein Teil des Gesamtverbands am Zwischenbahnhof stoppt, der restliche Zugteil allerdings durchfährt. Deshalb ist der Einstieg in den korrekten Zugteil insbesondere an den großen Stationen wichtig, wo der Gesamtverband als ein vollständiger Zug am Bahnsteig steht. Hier kann es passieren, dass Fahrgäste aus Unachtsamkeit den falschen Zugteil besteigen. Darüber hinaus können sich die Fahrgäste im Gesamtzug nicht mehr frei bewegen, sondern nur noch in ihrer Einheit, welche nur noch aus zwei bis vier Wagen bestehen kann. Hier ist eine effektive Auslastungssteuerung sehr wichtig, um Überfüllung zu vermeiden. Eine Umverteilung von Fahrgästen während der Fahrt auf weniger frequentierte Wagen ist aufgrund der virtuellen Kupplung und des neuartigen Betriebskonzepts nicht mehr möglich.

Ein weiterer Aspekt ist das Thema Pünktlichkeit. Damit die Flügel-Manöver im Slip Coaching-Betriebsverfahren korrekt ablaufen können, ist eine sehr hohe Pünktlichkeit erforderlich (ähnlich zum Shinkansen-Betrieb in Japan). Ob diese hohe Pünktlichkeit gegenüber der heutigen Pünktlichkeit auf der deutschen Referenzrelation erreicht werden kann, ist fraglich. Insbesondere beim Stärken von Zügen ist eine Einhaltung des Fahrplans sehr wichtig. Beim virtuellen Kuppeln muss der anfahrende Zugteil exakt zu einer bestimmten Zeit losfahren, um sich mit dem durchfahrenden Zug verbinden zu können. Dies erfordert eine exakte Einhaltung der Abfahrtszeit. Dieser Aspekt bedingt wiederum weitere Einschränkungen wie z. B. einen Einstieg nur drei Minuten bis zur Abfahrt zu erlauben, um einen pünktlichen Start zu gewährleisten. Hier wäre es demnach notwendig, den Fahrgästen eine Einstiegszeit zu kommunizieren anstatt einer Abfahrtszeit.

Beim Slip Coaching-Betriebskonzept ist es Prinzip bedingt nicht mehr möglich, lokale Zwischenverbindungen anzubieten, bspw. eine Fahrt von Kassel nach Fulda. Stattdessen müssten die Fahrgäste Umstiege und Umwegverbindungen nutzen. Deshalb ist es erforderlich, eine zusätzliche lokale Linie (local line) einzuführen, welche z. B. stündlich verkehrt und wie bei den meisten heutigen ICE-Zügen an jeder Station entlang der Strecke hält.

Beim Szenario mit einer Zuglänge von zwei mal 400 m Zuglänge (doppelte Kapazität) sind beim Halt in großen Knoten zwei Bahnsteige erforderlich, um den Gesamtverband aufzunehmen. Das bedeutet, dass der Bahnsteigbedarf in großen Knoten steigt. Es ist aber offen, ob die Zahl der Bahnsteige auf mittlere Sicht in ausreichendem Maße anwachsen wird. Hier gilt es zu klären, ob die Knoten wie Hannover und Frankfurt ausreichend Bahnsteigkapazitäten bieten, falls ein derartiges Fahrplanszenario umfassend umgesetzt würde.

Die allgemeine Wirtschaftlichkeit sehr kurzer HGV-Triebzüge ist nicht abschließend geklärt. Die meisten HGV-Züge besitzen in der Regel acht oder mehr Wagen. Es sind nur wenige Typen bekannt, die weniger als sechs Wagen aufweisen. Als Beispiel seien hier der deutsche ICE-T als fünfteilige Version sowie die spanische, vierteilige RENFE Class 120 Alvia genannt (s. Tabelle 1). Diese beiden Typen sind bis heute im Fahrgasteinsatz. Ein Exemplar für einen besonders kurzen Hochgeschwindigkeitszug stellt der ICE-TD dar. Die Besonderheit dieser ICE-Baureihe lag im dieselelektrischen Antrieb sowie in der geringen Länge von lediglich vier Wagen. Allerdings sind diese Züge unter anderem aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr in Betrieb und sollen verschrottet werden [57, 58]. Die kostenintensive Antriebstechnologie in Verbindung mit einer geringen Zuglänge waren entscheidende Faktoren, die einen weiteren Betrieb aus Sicht der Deutschen Bahn nicht mehr zuließen [59]. Es ist zu prüfen, inwieweit der Betrieb von kleinen Triebzug-Einheiten mit zwei bis vier Wagen wirtschaftlich darstellbar ist. Komfortmerkmale wie Bordrestaurants, Multifunktionsbereiche oder Familienabteile sind wahrscheinlich nicht oder nur mit Einschränkungen umsetzbar, weil der zur Verfügung stehende Raum primär für Sitzplätze benötigt wird.

Tabelle 1: HGV-Zugtypen mit geringer Gesamtlänge [51, 52, 56, 57, 58]

Zugtyp	Baureihe	Vmax in km/h	Wagenzahl	Gesamtlänge in m	Erster Fahrgasteinsatz	Status
ICE-TD	605	200	4	106,7	2001	Außer Betrieb
Alvia	120	250	4	106,2	2006	In Betrieb
ICE-T	415	230	5	132,6	1999	In Betrieb

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Bericht wurde ein neuartiges Betriebsverfahren für den Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsverkehr vorgestellt, das auf der Technik zum virtuellen Kuppeln aufbaut. Anhand von Voruntersuchungen kann gezeigt werden, dass eine höhere Angebotsqualität für den Fahrgast (kürzere Reisezeiten, mehr Direktverbindungen) mit einer erhöhten Streckenleistungsfähigkeit kombiniert werden kann. Allerdings sind einige technische Hürden und mögliche Nachteile weiter zu untersuchen, bevor eine konkrete Umsetzung beginnen könnte.

Es wurde ein erstes Fahrzeugkonzept beschrieben, ein Linien- und Fahrplanentwurf erstellt und das zu simulierende Betriebsszenario definiert.

Aufbauend auf den beschriebenen Arbeiten wird im weiteren Projektverlauf eine detaillierte mikroskopische Simulation des Verfahrens auf einem Abschnitt der gewählten Referenzstrecke durchgeführt. Hierfür werden Fahrzeugparameter, Streckendaten und betriebliche Zwangspunkte genauer ermittelt. Außerdem werden weitere Anforderungen in Bezug auf die ermittelten Problemfelder des Konzepts definiert. Abschließend soll eine Bewertung der erzielbaren Fahrgastreisezeiten, wenn das Konzept in das bestehende Bahnnetz eingefügt würde, erfolgen und die Übertragbarkeit auf andere Länder untersucht werden.

5 Literatur

- [1] Tilo Schumann: „Anforderungen an die Leit- und Sicherungstechnik (Dynamisches Flügeln)“, Meilenstein 2013/1, NGT 2, AP 1511, 05.11.2013
- [2] Eugen Polisky: „Gefährdungsuntersuchung Fernwirkende Kupplung“, NGT 2, Abschlussbericht, AP 1530, 30.06.2014
- [3] Eugen Polisky: „Regelungskonzept für eine sichere fernwirkende Kupplung“, NGT 2, Abschlussbericht, AP 1530, 26.02.2014
- [4] Andreas Lehner: „Beschreibung von Kommunikationsszenarien für das dynamische Flügeln, NGT 3, AP 2410, MS 24101406, 30.06.2014
- [5] Eugen Polisky, Andreas Lehner, Stefanie Schöne, Dirk Baumbach, Paul Zeller: „Zwischenbericht Konzepte dynamisches Flügeln und Szenarienbeschreibung“, NGT 3, AP 2410, MS 24101406, 01.07.2014
- [6] Paul Zeller: „Ortungsszenarien beim dynamischen Flügeln“, NGT 3, AP 2410, MS 24101406, 01.07.2014
- [7] Eugen Polisky, Andreas Lehner, Benjamin Siebler, Tilo Schumann, Stefanie Schöne, Dirk Baumbach: „Spezifikation der Anforderungen an die Teilsysteme“, NGT 3, AP 2410, MS 24101412, 11.03.2015
- [8] Eugen Polisky: „Generisches Antriebs- und Bremsmodell“, NGT 3, AP 2410, MS 24101512, 26.01.2016
- [9] Eugen Polisky: „Systemmodell“, NGT 3, AP 2410, MS 24101606, 28.06.2016
- [10] Eugen Polisky: „Regelungsalgorithmus“, NGT 3, AP 2410, MS 24101706, 30.08.2017
- [11] Tilo Schumann: „Generisches Betriebskonzept“, NGT 3, AP 2420, MS 24201509, 07.01.2016
- Eugen Polisky: „Betriebliche Anforderungen an die Regelung“, NGT 3, AP 2420, MS 24201606, 09.12.2016
- [12] Eugen Polisky, Tilo Schumann: „Einbindung des Regelungskonzepts in das Betriebskonzept“, NGT 3, AP 2420, MS 24201706, 07.07.2017
- [13] Stefanie Schöne, Tilo Schumann: „Beschreibung eines Betriebskonzepts auf Basis der zukünftigen LST“, NGT 3, AP 2420, MS 24201712, 02.03.2018
- [14] Dirk Baumbach: „Charakterisierung von optischen Sensoren zur Abstandsbestimmung, Konzept und Anforderungen“, NGT 3, AP 2430, MS 24301406, 30.06.2014

- [15] Paul Zeller: „Charakterisierung von Sensoren für das dynamische Flügeln“, NGT 3, AP 2430, MS 24301406, 01.07.2014
- [16] Ohne Autor: „Abstandsmesssystem Relativ-Messboxen“, NGT 3, AP 2430, MS 24301409, 25.09.2014
- [17] Andreas Lehner, Benjamin Siebler: „Messfahrten zur Erfassung der relevanten Daten für die Entwicklung und Evaluation von Relativortungsalgorithmen“, NGT 3, AP2430, MS 24301503, 26.05.2015
- [18] Benjamin Siebler: „Modellierung Sensorfehler“, NGT 3, AP 2430, MS 24301512, 26.01.2016
- [19] Dirk Baumbach: „Bericht über das Messmodell und die Modellierung der Fehlerverteilung eines Stereo-Kamerasystems“, NGT 3, AP 2430, MS 24301512, 12.01.2016
- [20] Eugen Funk, Dirk Baumbach, Denis Griebbach, Anko Börner: „Optimierung der Sensor- & Systemparameter des Stereosystems“, NGT 3, AP 2430, MS 24301606, 01.08.2016
- [21] Benjamin Siebler: „Algorithmus für Pseudorange und ggfs. Trägerphase“, NGT 3, AP 2430, MS 24301612, 15.12.2016
- [22] Eugen Funk: „Messkampagne zur Abstandsmessungvalidierung“, NGT 3, AP 2430, MS 24301703, 13.04.2017
- [23] Benjamin Siebler: „Sensorfusion implementiert und getestet“, NGT 3, AP 2430, MS 24301712, 11.12.2017
- [24] Dirk Baumbach: „Entwicklung eines optischen Abstandssimulators“, NGT 3, AP 2430, MS 24301806, 12.06.2018
- [25] Benjamin Siebler: „Simulator für Abstandsmessfehler“, NGT 3, AP 2430, MS 24301806, 04.07.2018
- [26] Andreas Lehner: „Kommunikationskonzept und Delay-Abschätzung“, NGT 3, AP 2440, MS 24401503, 16.06.2015
- [27] Andreas Lehner, Paul Unterhuber: „Messfahrten Funkübertragungscharakterisierung“, NGT 3, AP 2440, MS 24401509, 30.10.2015
- [28] Andreas Lehner: „Daten-Postprocessing und Messdatenanalyse“, NGT 3, AP 2440, MS 24401603, 04.04.2016
- [30] Andreas Lehner, Damini Gera, Paul Unterhuber, Mohammad Solimann: „Fertiges Modell Funkkanal (Nachrichtenfehler und Update Delay)“, NGT 3, AP 2440, MS 24401609, 15.11.2016

- [31] Andreas Lehner, Damini Gera: „Abschluss Simulation WLAN Vielfachzugriff“, NGT 3, AP 2440, MS 24401704, 25.04.2017
- [32] Andreas Lehner: „Modell für Fehlerraten und Delays“, NGT 3, AP 2440, MS 24401712, 29.12.2017
- [33] Andreas Lehner: „Kommunikationssimulator“, NGT 3, AP 2440, MS 24401806, 28.06.2018
- [34] Andreas Lehner, Paul Zeller: „Entwurf Kommunikationskonzept“, NGT 3, AP 2440, 08.08.2014
- [35] Arne Henning, Klaus Ehrenfried, Henning Wilhelmi, Thieme: „Aerodynamische Effekte – Aufbau abgeschlossen und getestet“, NGT 3, AP 2450, MS 24501609, 25.10.2016
- [36] Arne Henning, Klaus Ehrenfried, Henning Wilhelmi, Thieme: „Aerodynamische Effekte – Erste Ergebnisse Kräfte“, NGT 3, AP 2450, MS 24501612, 05.01.2017
- [37] Arne Henning, Klaus Ehrenfried, Henning Wilhelmi, Thieme: „Aerodynamische Effekte – Ergebnisse bei hohen Re - Zahlen; Kräfte auf besonders beaufschlagte Fahrzeugteile identifizieren“, NGT 3, AP 2450, MS 24501708, 21.11.2017
- [38] Arne Henning, Klaus Ehrenfried, Henning Wilhelmi, Keith Weinman, Thieme: „Aerodynamische Effekte – Abschlussbericht“, NGT 3, AP 2450, MS 24501812, 07.12.2018
- [39] Dirk Baumbach: „Bericht zur Hardware- & Software-seitigen Einbindung eines GPS-Sensormoduls in das IPS-System“, NGT 3, AP 2460, MS 24601412, 10.12.2015
- [40] Dirk Baumbach: „Bericht über die Erstellung des GPS-Beobachtungsmodells für die Sensordatenfusionierung“, NGT 3, AP 2460, MS 24601512, 26.01.2016
- [41] Dirk Baumbach: „Bericht über die Entwicklung der Navigationsgleichungen für Schienenfahrzeuge bzw. für die Aufgabe der Selbstlokalisierung im Außenbereich“, NGT 3, AP 2460, MS 24601612, 02.01.2017
- [42] Dirk Baumbach, Eugen Funk, Denis Griebach, Anko Börner, Max Buder: „Integrales Positionierungssystem - aktueller Stand der Absolutpositionierung“, NGT 3, AP 2460, MS 24601612, 06.01.2017
- [43] Dirk Baumbach: „Bericht zur Bewertung der globalen Navigationslösung, berechnet aus der Kombination verschiedener Sensoren (GPS, VO, INS)“, NGT 3, AP 2460, MS 24601712, 15.01.2018
- [44] Joachim Winter, Andreas Lehner, Eugen Polisky: “Electronic Coupling of Next Generation Trains“, Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, 5 – 8 Apr. 2016. [Online] Available: <https://elib.dlr.de/109481/> [Accessed: 15 Jan. 2020]

[45] Railway Wonders of the World: "Slip Coaches: Dividing Express Trains at Speed", Railway Wonders of the World, 21 June 1935. [Online] Available:

<https://www.railwaywondersoftheworld.com/slip-coaches.html> [Accessed: 15 Jan. 2020]

[46] Railway Gazette International: "The Last Slip Coach", 02.09.1960, p. 266

[47] Deutsche Bahn, DB Fernverkehr: "Fahrgäste im DB Fernverkehr", 07/2019, [Online]:

<https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4245256/5d4bd9341b5df7f110e32aef4626e7af/Download-Infografik-Fahrgastzahlen-DB-Fernverkehr-data.jpg> [Abgerufen: 28.01.2020]

[48] CDU, CSU und SPD, „Ein neuer Aufbruch für Europa – Eine neue Dynamik für Deutschland – Ein neuer Zusammenhalt für unser Land“, Koalitionsvertrag zur 19. Legislaturperiode, S. 77, Zeile 3549 ff., 14.03.2018. [Online]

<https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/847984/5b8bc23590d4cb2892b31c987ad672b7/2018-03-14-koalitionsvertrag-data.pdf?download=1> [Abgerufen: 15.01.2020]

[49] Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Matthias Gastel, Annelena Baerbock, Harald Ebner, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 19/12508 – Nächste Umsetzungsschritte für den Deutschland-Takt 2030. [Online]

<http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/19/125/1912508.pdf> [Abgerufen: 28.01.2020]

[50] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Zielfahrplan Deutschland-Takt: Informationen zum zweiten Gutachterentwurf“, Präsentation, 07.05.2019. [Online]

https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/schienenengipfel-zweiter-gutachtenentwurf.pdf?__blob=publicationFile [Abgerufen: 15.01.2020]

[51] Via libre: „En pruebas la serie 120, trenes de ancho variable y bitensión para 250 km/h“, [Online] <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=487&cs=mate> [Accessed: 31 Jan. 2020]

[52] Via libre: „En servicio los trenes serie 120 entre Madrid y Barcelona“, [Online] <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=226&cs=alta> [Accessed: 31 Jan. 2020]

[53] Joachim Winter: „Next Generation Train – 20 Jahre Forschung für die Eisenbahn“, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe 03/2019, S. 17-21, <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=587671>

[54] The European Commission, "Commission Regulation No 1301/2014 on the technical specifications for interoperability relating to the 'energy' subsystem of the rail system in the Union", Official Journal of the European Union, §4.2.13., 18 Nov. 2014. [Online] Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1301> [Accessed: 15 Jan. 2020]

[55] Stefanie Schöne: „Identifikation von Lücken der bestehenden Leit- und Sicherungstechnik gegenüber dem generischen Betriebskonzept“, NGT 3, AP 2420 Generisches Betriebskonzept, Liefergegenstand zum 31.12.2016, 16.01.2017

[56] Deutsche Bahn, DB Netz, Trassenfinder, Triebfahrzeugübersicht, [Online] www.trassenfinder.de
[Abgerufen: 28.01.2020]

[57] Eisenbahn-Revue International: „ICE-TD werden abgestellt“, Heft 12/2003, S. 541

[58] Eisenbahn-Revue International: „DB plant ICE-TD-Verschrottung in größerem Umfang“, Heft 12/2019, S. 644

[59] Lars Müller: „Deutsche Bahn will Diesel-ICE verkaufen“, Freie Presse Chemnitz, 14.12.2016, S. 7

[60] Incola, Abbildung: Bildschirme am Bahnhof Bologna Centrale, ETR 500 in arrivo a Bologna Centrale, Wikimedia Commons, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en),
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a7/ETR_500_Bologna_Centrale_AV_1.jpg [Online]
[Abgerufen: 05.02.2020]

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundkonzept des Fahrplans.....	8
Abbildung 2: NGT HST, Quelle: DLR.....	10
Abbildung 3: Mögliche Konfigurationen der Zugverbände beim Slip Coaching	11
Abbildung 4: Liniennetz des Betrachtungsraums	14
Abbildung 5: Bildschirme am Bahnhof Bologna Centrale (siehe rote Pfeile), bearbeitet, Incola, Wikimedia Commons, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported, https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en [60]	16
Abbildung 6: Zeit-Weg-Linie aus der vereinfachten Vorsimulation zwischen Göttingen und Kassel	17



7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: HGV-Zugtypen mit geringer Gesamtlänge [51, 52, 56, 57, 58]	20
---	----

8 Abkürzungsverzeichnis

ETCS	European Train Control System
NGT BIT	Next Generation Train Backbone of Intermodal Transport
NGT HST	Next Generation Train High-Speed Train
VC	Virtual Coupling
VCTCS	Virtual Coupling Train Control System