

Erprobung des Verkehrssystems der Neuen Bahntechnik Paderborn

Prof. Dr.-Ing. H. Grotstollen, Dipl.-Ing. M. Henke
*Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik,
Universität Paderborn
Pohlweg 47-49, D-33098 Paderborn
Tel.: 05251/60-2209, Fax.: 05251/60-3433
E-mail: grotstollen@lea.uni-paderborn.de*

Prof. Dr.-Ing. H. A. Richard, Dipl.-Wirt. Ing. M. Sander
*Fachgruppe Angewandte Mechanik,
Universität Paderborn
Pohlweg 47-49, D-33098 Paderborn
Tel.: 05251/60-2203, Fax.: 05251/60-3719
E-mail: richard@fam.uni-paderborn.de*

Zusammenfassung

An der Universität Paderborn wird ein neuartiges Bahnsystem entwickelt, dessen Hauptmerkmale der modulare Aufbau, ein vollaktives Fahrwerk und ein umfassendes Logistikkonzept sind. Die technischen Komponenten stellen hierbei ein linearer Direktantrieb, ein vollaktives Feder-/Neigemodul und ein aktives Spurführungsmodul dar.

Die mittels Linearantrieb betriebenen, spurgeführten Fahrzeuge vereinen die Vorteile des Transrapidantriebs mit der Nutzung bestehender Bahntrassen. Das Zusammenspiel von Informationstechnik, Sensorik und Aktorik ermöglicht ein vollkommen neuartiges mechatronisches System Bahn. Dies wird neue Perspektiven für die Bahn von morgen eröffnen.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes „Neue Bahntechnik Paderborn“ (NBP) bereits entwickelten Systeme sollen auf einer Teststrecke erprobt werden. Die bisherigen Planungen für die Probestrecke sowie die Konzipierung der Linearantriebe werden in diesem Beitrag vorgestellt.

Schlüsselwörter

Neue Bahntechnik Paderborn, Probestrecke, Linearantrieb, Versuchsbetrieb, Konzeption der Linearmotorregelung

1 Probestrecke an der Universität Paderborn

An der Universität Paderborn besteht seit nun mehr 3 Jahren das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Neue Bahntechnik Paderborn“. Sechs Professoren aus den Bereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftswissenschaften erforschen mit ihren Arbeitsgruppen dabei die Möglichkeit, einen Teil der Technik des Transrapid für die derzeitige Bahntechnik zu nutzen. Dabei soll auf herkömmlichen Bahnstrecken das Antreiben und Bremsen durch einen berührungslosen und verschleissfreien Direktantrieb in Linearmotortechnik erfolgen, während im Gegensatz zur Transrapidtechnik das Tragen und Führen auf den herkömmlichen Schienensystemen vorgesehen ist. Die Tatsache, dass der Fahrbetrieb mit kleinen Shuttles realisiert werden kann, ist auch für die Nutzung von wenig befahrenen Strecken und die Anbindung an den Personennahverkehr von großer Bedeutung.

Die bisherigen Forschungsergebnisse und Konzepte sollen nun durch Testfahrten auf einer Versuchsstrecke erhärtet bzw. erprobt werden. Die Versuchsstrecke im Maßstab 1 : 2,5 ist als ein Rundkurs aus Geraden und Kurvenstücken mit einer Gesamtlänge von 600m geplant (Abbildung 1). Zusätzlich zum Rundkurs ist eine Bahnhofs- und Weichensituation vorgesehen. Der Testbetrieb soll mit mehreren Versuchsfahrzeugen durchgeführt werden, um logistische Probleme zu studieren und Ein- und Auskopplungsvorgänge zu erproben. Um die Vorteile der neuen Technik anschaulich zeigen zu können, sollen Steigungen größer als 4% realisiert werden.

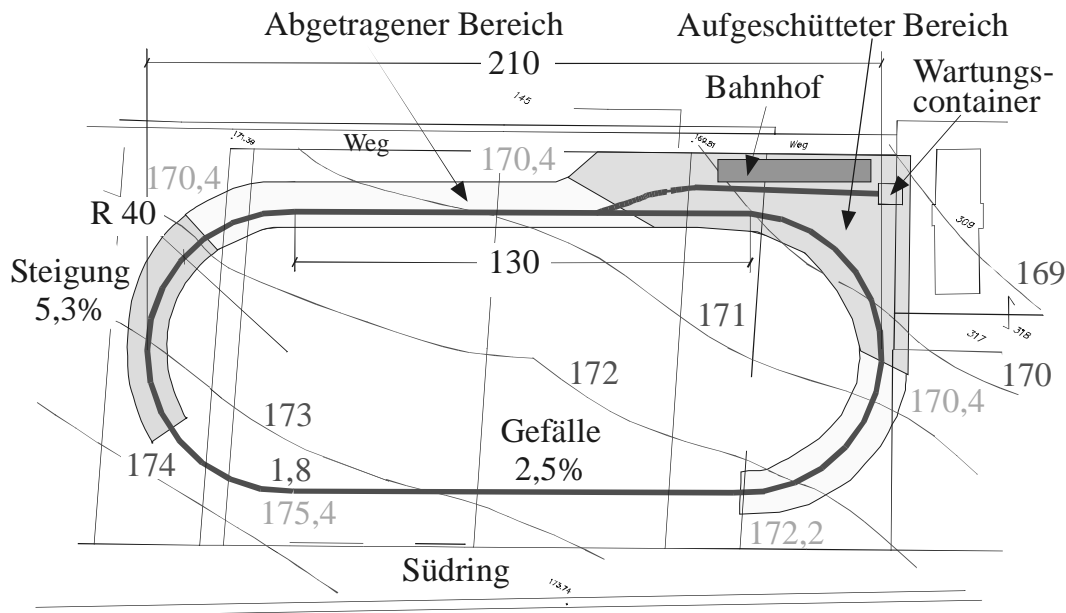


Abbildung 1: Gestaltung des Rundkurses inklusive der Steigungen

1.1 Gründe für die Probestrecke

Die Versuchsstrecke hat für die Entwicklung des Projekts „Neue Bahntechnik Paderborn“ eine entscheidende Bedeutung, da sie zahlreiche technische Grundversuche ermöglicht. Zu diesen Grundversuchen zählen:

- Untersuchungen einzelner Systemkomponenten,
- systematische Tests zur Erprobung des Zusammenwirkens verschiedener Komponenten (Systementwicklung und –erprobung),
- betriebliche Demonstrationen (Betriebsabläufe, Betriebsleittechnik) und
- Parameterbestimmungen im Dauerbetrieb (z.B. Zusammenwirken von Fahrzeug und Fahrweg, Effektivität des neuen Bahnsystems, Auswirkung auf die Umwelt)

Des Weiteren sollen mit Testfahrten auf der Probestrecke das Gesamtsystemverhalten des Systems „Neue Bahntechnik Paderborn“ erprobt werden.

1.2 Aufbau und Konstruktion

Um unterschiedliche Schienenober- und –unterbauten testen zu können, soll ein Teil der Strecke als Schotter- und der restliche Teil als Stahlkonstruktion errichtet werden.

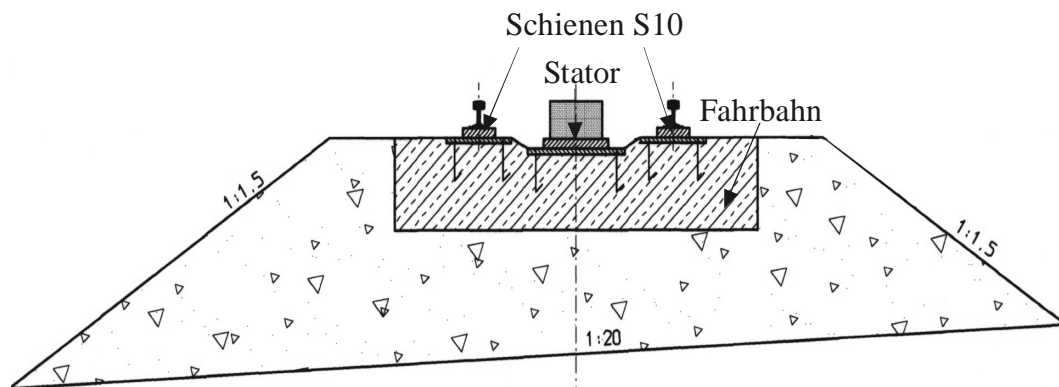


Abbildung 2: Schotterkonstruktion der Versuchsstrecke

Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau der Schotterkonstruktion. Zwischen den Schienen mit dem Profil S10, die auf Schwellen verlegt werden, soll der Stator angebracht werden. Die Spurweite der Versuchsstrecke soll 600 mm betragen. Für den Oberbau könnte sowohl die herkömmliche Bauweise mit geschotterten Schwellen oder aber auch die Feste Fahrbahn [Rhe00, Bög00] verwendet werden.

Die Oberbauform Feste Fahrbahn wird bei der Deutschen Bahn AG derzeit für das Hochgeschwindigkeitsnetz eingesetzt [Bac00].

Die Unterkonstruktion der Ständervariante (Abbildung 3) besteht aus drei I-Profilen, die zur Erhöhung der Steifigkeit durch Querträger, ebenfalls I-Profile, verbunden sind.

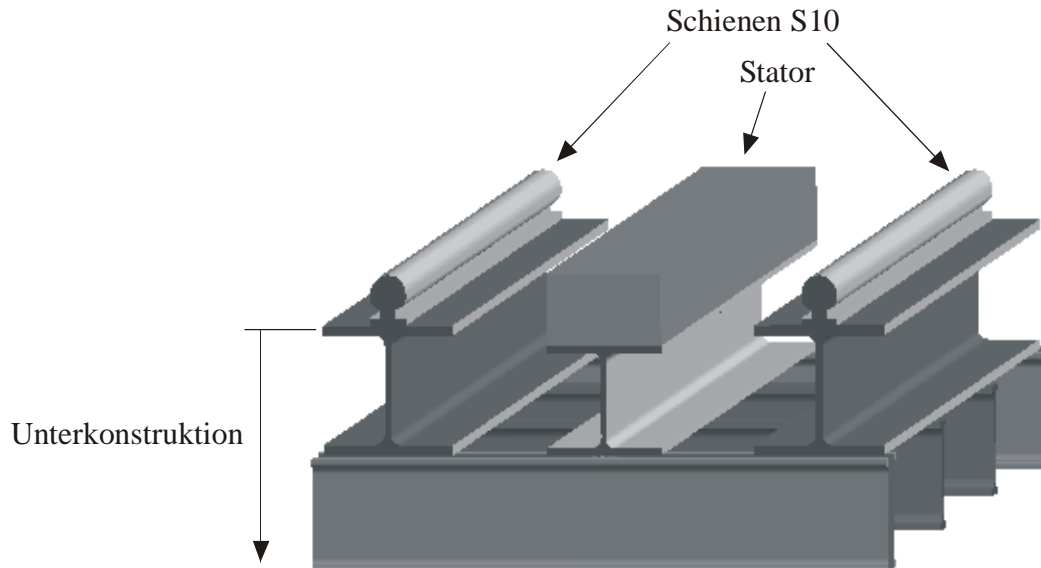


Abbildung 3: Stahlkonstruktion der Versuchsstrecke

Diese gesamte Konstruktion soll über Ständer mit einer Höhe von bis zu 1,6m auf einem Betonuntergrund aufgebaut werden.

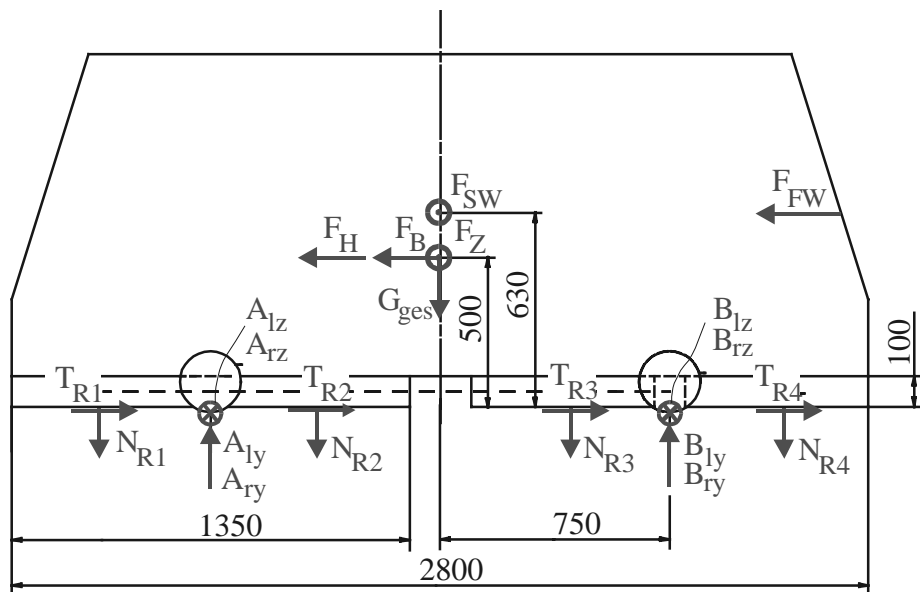


Abbildung 4: Lastannahmen für das Versuchsfahrzeug

Aufgrund der andersartigen Belastung während des Betriebs des neuen Bahnsystems wurden zunächst zahlreiche Konstruktionen für die Schienenoberbauten entwickelt und berechnet, die den Antrieb durch den Linearmotor berücksichtigen. Zur Berechnung der Oberbauten war es notwendig, Lastannahmen festzulegen. Zusätzlich zu den üblichen Kräften, wie z.B. den Seitenwindkräften [DS804, Lei70], kommt bei dem System NBP die Anziehungskräfte des Linearmotors N_R (Abbildung 4) hinzu.

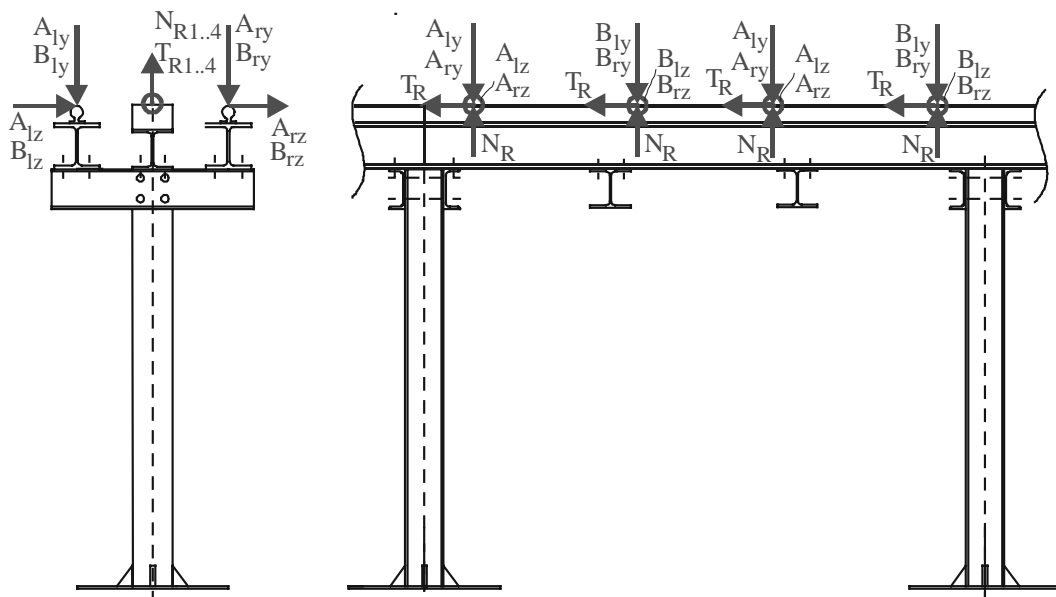


Abbildung 5: Detailplanung der Streckenkonstruktion (Stahlkonstruktion)

Die daraus resultierenden Aufstands-, Antriebs- und Anziehungskräfte sind in Abbildung 5 dargestellt. Dabei ist angenommen worden, dass sich auf dem gezeigten Streckenabschnitt zwei Fahrzeuge befinden.

1.3 Beabsichtigter Versuchsbetrieb

Bei dem System „Neue Bahntechnik Paderborn“ handelt es sich um eine Kombination verschiedenartiger Techniken. Hierzu zählen:

- der Linearantrieb,
- das vollaktive Feder-/Neigemodul,
- die Shuttletechnik,
- die Weichentechnik und

- das Logistikkonzept.

Die einzelnen Techniken und insbesondere das Gesamtsystemverhalten sollen auf der Teststrecke im Maßstab 1 : 2,5 überprüft werden.

Dazu sind zahlreiche Versuche vorgesehen, bei denen das Fahrverhalten auf gerader Strecke oder aber in Kurvenabschnitten sowie bei Weichenüberfahrten analysiert werden soll. Das Versuchsfahrzeug mit einer Gesamtmasse von 500 kg soll eine maximale Geschwindigkeit von 10m/s erreichen. Als maximale Beschleunigung sind 1m/s^2 und Verzögerungen bei einer Schnellbremsung von $1,15\text{m/s}^2$ vorgesehen. Die Fahrten auf der Teststrecke sollen zeigen, dass die Linearmotortechnik auch extreme Fahrleistungen erlaubt, wie z.B. das Überwinden von größeren Steigungen als es bei der herkömmlichen Bahntechnik üblich ist.

Durch die Shuttletechnik ist es möglich, neue Logistikkonzepte (zielreiner Fahrbetrieb) zu realisieren. Aus wirtschaftlicher aber auch technischer Hinsicht ist es notwendig, mehrere Shuttles zu Konvois zusammenzuführen. Auf der Probestrecke soll sowohl das Zusammenführen als auch das Ausfädeln einzelner Shuttles aus dem Konvoi untersucht werden.

Die bereits im Automobilbereich eingesetzte Feder-/Neigetechnik soll auch bei der Neuen Bahntechnik eingesetzt werden. Das Zusammenwirken von Aktoren, Sensoren und digitaler Signalverarbeitung dieses mechatronischen Systems wird im Rahmen der Fahrversuche optimiert werden.

Außerdem sollen auf dieser Strecke die dem Linearmotor zukommenden Aufgaben getestet werden. Zu diesen Aufgaben zählen das Antreiben und Bremsen, die Nickregelung sowie die Übertragung der notwendigen Energie in das Bordnetz des Fahrzeugs.

2 Gestaltung der Linearantriebe

2.1 Linearmotoren

Angepasst an das Gesamtkonzept wird der Linearmotor als Langstatormotor ausgeführt. Diese Motorvariante erfordert zwar mit der Verlegung des Stators längs der gesamten Strecke einen Aufwand, der bei ausreichender Fahrzeugdichte gerechtfertigt ist, bietet aber unter anderem den Vorteil, dass die hohe Antriebsleistung nicht auf die Fahrzeuge übertragen werden muss. Diese Motorvariante erfordert zwar mit der Verlegung des Stators längs der gesamten Strecke einen hohen Aufwand; dieser ist aber bei ausreichender Fahrzeugdichte durchaus gerechtfertigt und bietet unter anderem den Vorteil, dass die hohe Antriebsleistung nicht auf die Fahrzeuge übertragen werden muss. Wie beim Transrapid ist der

Stator, der ein magnetisches Wanderfeld zu erzeugen hat, in Abschnitte unterteilt, die nur dann bestromt werden, wenn sich ein Fahrzeug darauf befindet [Für93]. Jedes Fahrzeug ist wiederum mit einem Läufer ausgestattet, der ebenfalls ein magnetisches Feld erzeugt. Abbildung 6 zeigt einen Längsschnitt durch den Langstator und die Läufer von zwei Shuttles sowie die von den Wicklungen erzeugten, annähernd sinusförmig verteilten Magnetfelder.

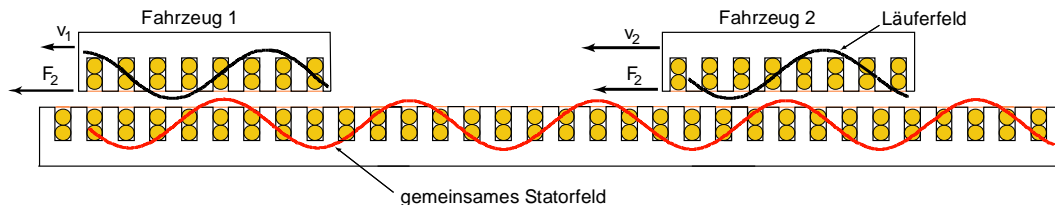


Abbildung 6: Wirkungsweise des Linearmotors

Durch das Zusammenwirken der Ständer- und Läuferfelder entstehen sowohl horizontale als auch vertikale Kräfte. Die einen wirken auf die Shuttles - abhängig davon, ob das Läuferfeld nacheilt oder voreilt - treibend oder bremsend (im Bild wirken diese Kräfte in Richtung der Geschwindigkeit nach links, also treibend). Die Vertikalkräfte bewirken eine Anziehung von Stator und Läufer, die nichtlinear vom Abstand beider Teile abhängt.

Wesentliche Voraussetzung für die Entstehung einer kontinuierlich wirkenden, möglichst konstanten Horizontalkraft ist, dass sich (bei konstanten Stromamplituden) die relative Lage des Läuferfelds zum Ständerfeld nicht verändert, was bedeutet, dass sich beide Felder mit genau der gleichen Geschwindigkeit bewegen müssen. Aufgrund der Kraftwirkungen ergibt sich die Synchronisierung der Felder selbsttätig, solange der Motor nicht überlastet wird. Für den Transrapid, dessen Läuferfeld mit Gleichstrom erregt wird und nicht relativ zum Fahrzeug verschoben werden kann, bedeutet das, dass sich das Fahrzeug genau mit der Geschwindigkeit der magnetischen Felder bewegt.

Der logistische Ansatz des NBP-Konzepts sieht zielreinen Betrieb vor, wobei sich die Shuttles während der Fahrt zu Kolonnen zusammenschliessen um Windwiderstände zu minimieren. Auch Sicherheitsaspekte wie das Verhindern von Auffahrunfällen spielen hier eine Rolle. An Bahnhöfen scheren die Shuttles aus den Kolonnen aus, und die entstehenden Lücken werden durch die verbleibenden Fahrzeuge selbsttätig geschlossen. Um diese Fahrzeugkolonnen bilden und wieder auflösen zu können, muss es bei der Neuen Bahntechnik Paderborn möglich sein, mehrere Fahrzeuge, die sich auf dem gleichen Statorabschnitt befinden, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu betreiben. Um das zu ermöglichen, werden die Läuferwicklungen nicht wie beim Transrapid mit Gleichstrom erregt, sondern wie die Statorwicklung dreiphasig ausgeführt und mit Drehstrom gespeist. Die Geschwindigkeit eines Shuttles setzt sich dann aus der durch die Statorfrequenz fest-

gelegten Geschwindigkeit der magnetischen Felder und der über die Läuferfrequenz individuell einstellbaren Geschwindigkeit des Läufers relativ zum Läuferfeld zusammen. Diese Art der Motorspeisung stellt hohe Ansprüche an die Signalverarbeitung, das gesamte digitale Regelsystem und die Signalübertragung, da eine Vielzahl von Informationen zwischen der ortsfesten Statorstrom-Regleinrichtung und den Shuttles ausgetauscht werden muss.

Der konstruktive Entwurf der Fahrzeuge sieht einachsige Fahrwerke vor, da die Ausrüstung der Shuttles mit Drehgestellen zu sehr schweren Fahrwerken führen würde. Auch der Wartungsaufwand würde unzulässig hoch. Daher wird der Läufer im Fahrzeug unter der Achse angebracht. Durch die im Luftspalt angreifende Schubkraft wird ein Drehmoment M um die Radachse erzeugt. Liegt eine Unsymmetrie des Läufers bezüglich der Achse vor, an der er aufgehängt ist (Ursache der Unsymmetrie kann ein ungleichförmiger Luftspalt sein), dann erzeugen auch die Vertikalkräfte ein Drehmoment um diese Achse (Abbildung 7). Daher wird der Läufer in zwei Hälften unterteilt, die sich vor und hinter der Drehachse befinden und voneinander unabhängig gespeist werden.

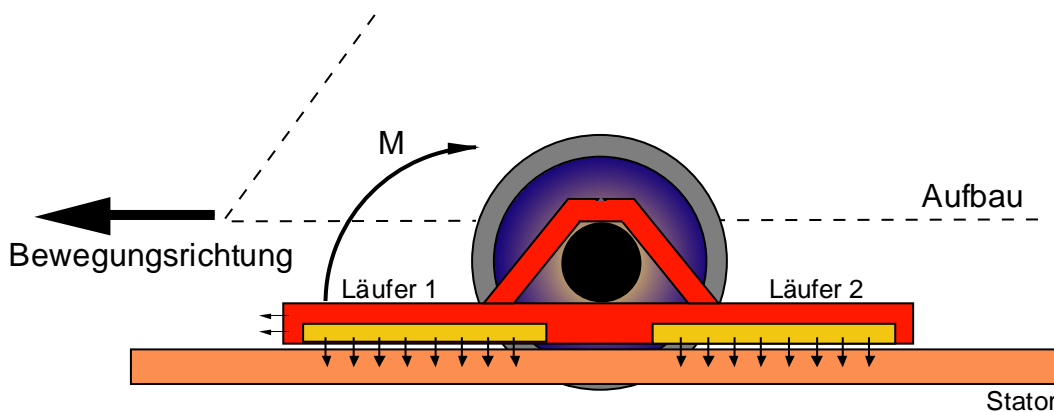


Abbildung 7: Aufteilung des Läufers in zwei Segmente

Die damit bestehende Möglichkeit zur Beeinflussung der vor und hinter der Achse wirksamen Vertikalkräfte gestattet die Erzeugung eines Drehmoments, mit dem die Nickbewegung des Läufers stabilisiert werden kann, und es erübrigt sich, diese Bewegung durch eine mechanische Vorrichtung zu verhindern, die eine sehr hohe Steifigkeit haben müsste, da die Gleichgewichtslage aufgrund der Magnetkräfte instabil ist und der Luftspalt zwischen Läufer und Stator weniger als 10 mm betragen soll.

2.2 Statorstromversorgung

Herkömmliche Bahnsysteme mit linearen Langstatormotoren sind mit Stromrichtern ausgerüstet, die ein definiertes Streckenstück mit Energie versorgen [Lin81]. An der Probestrecke wird für jedes Fahrzeug ein Paar von Stromrichtern vorgesehen, je einer für die Speisung der geradzahligen und der ungeradzahligen Abschnitte. Entsprechend den drei geplanten Fahrzeugen 1 bis 3, mit denen Kolonnenfahrt untersucht werden soll, laufen drei Leitungspaare 1A bis 3A entlang der Versuchsstrecke, siehe Abbildung 8. Über elektromechanische Schalteinrichtungen werden dann die einem bestimmten Shuttle zugeordneten Leitungen mit jeweils dem Statorabschnitt verbunden, auf dem sich dieses Shuttle gerade befindet. Da die Schaltvorgänge im stromlosen Zustand ablaufen, werden die Schalter nur wenig beansprucht. Dennoch ist vorgesehen, die elektromechanischen Schalteinrichtungen später durch eine einfache Lösung auf der Basis von Thyristoren zu ersetzen.

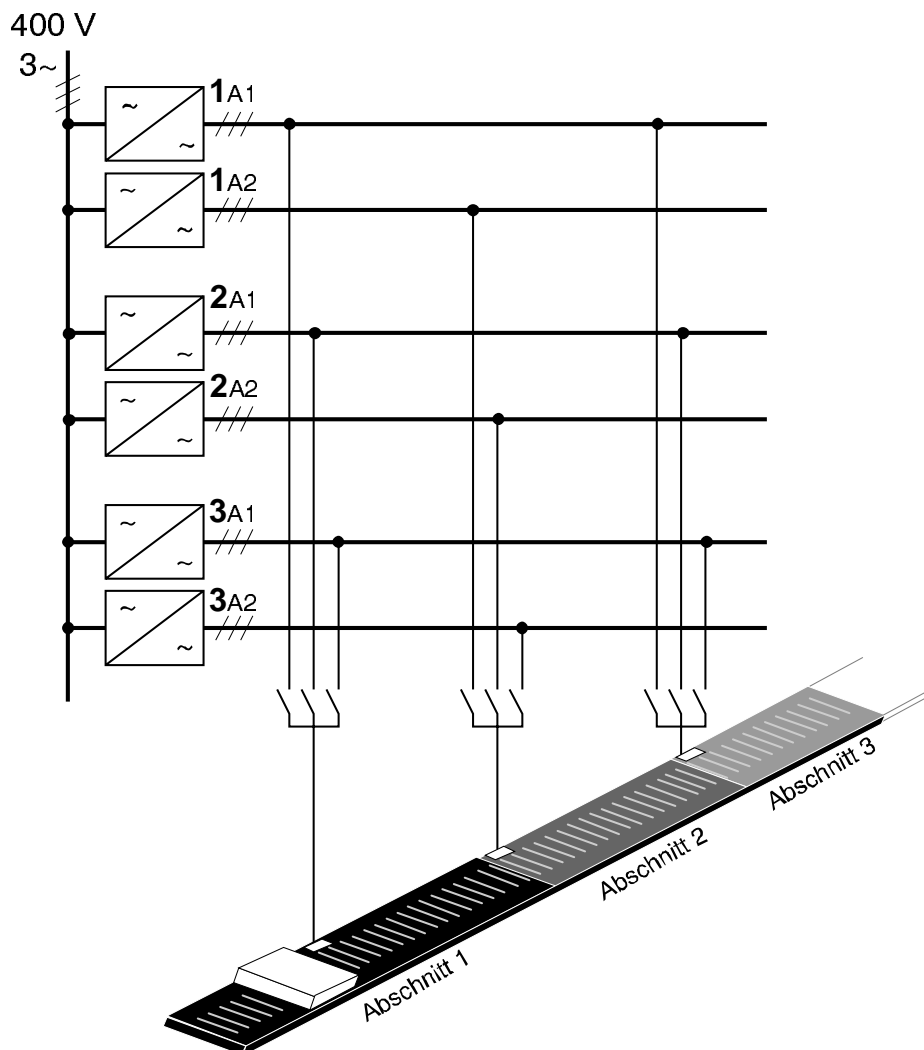


Abbildung 8: Speisung des Langstator-Linearmotors

2.3 Bordstromversorgung

Auf dem Fahrzeug befinden sich mehrere elektrische Verbraucher, die mit unterschiedlichen Spannungen versorgt werden müssen. So müssen die Läuferwicklungen des Linearmotors mit dreiphasigem Wechselstrom variabler Amplitude und Frequenz gespeist werden, während andere Verbraucher wie die an Bord befindlichen Rechnerkomponenten, das Hydraulikaggregat und die Messeinrichtungen die übliche Festspannung benötigen. Um eine sichere Versorgung auf dem Fahrzeug zu gewährleisten, werden Hochleistungsbatterien als Energiepuffer eingesetzt. Sie stellen über einen Gleichstromsteller eine geregelte Gleichspannung bereit, aus der die vorgenannten Verbraucher über weitere Stromrichter versorgt werden (Abbildung 9).

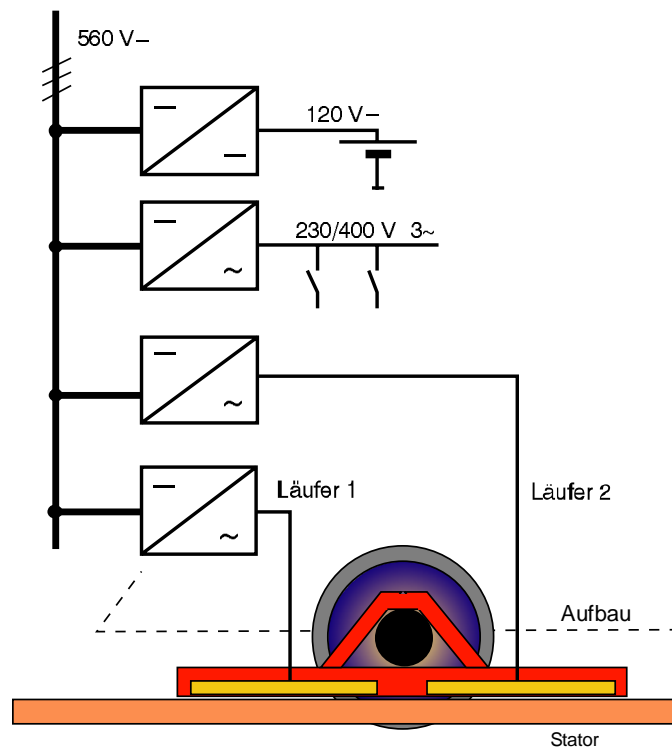


Abbildung 9: Aufbau der Bordstromversorgung

Die Energieübertragung auf das Fahrzeug erfolgt auf der Versuchsstrecke zunächst über Stromschienen; es soll aber auch die Möglichkeit untersucht werden, den Linearmotor für die Energieübertragung zu nutzen. Diese Möglichkeit besteht insofern, als bei dem verwendeten Prinzip der Asynchronmaschine Leistung von der Statorwicklung in die Läuferwicklung dann übertragen wird, wenn sich die Maschine im untersynchronen Betrieb befindet, wenn sich also der Läufer mit dem Fahrzeug langsamer bewegt als die magnetischen Felder bzw. wenn das Statorfeld schneller wandert als das Fahrzeug. Das bedeutet allerdings, dass die Stän-

derwicklung mit höherer Frequenz gespeist werden muss als bei synchronem Betrieb mit der Folge, dass stator- und läuferseitig ein höherer Spannungsbedarf vorliegt und Stromrichter höherer Leistung eingesetzt werden müssen. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für das gesamte Systems werden später darüber entscheiden, welche Lösung für die Energieübertragung auf das Fahrzeug sinnvoll ist.

Es sei schließlich angemerkt, dass die Geschwindigkeit eines Shuttles für kurze Beschleunigungsvorgänge durch die Vorgabe einer geeigneten Läuferfrequenz auch über die Geschwindigkeit der Wanderwellen hinaus gesteigert werden kann (übersynchroner Betrieb), wobei das Bordnetz allerdings die zusätzlich benötigte Leistung bereitstellen muss [Hen99].

2.4 Konzept für die Regelung der Linearantriebe

Dem Linearmotor fallen somit drei Aufgaben zu:

- Erzeugung der zum Treiben und Bremsen erforderlichen Horizontalkraft,
- Stabilisierung der Lage des drehbar aufgehängten Läufers bzw. Unterdrückung der möglichen Nickbewegung durch die Vertikalkräfte,
- Übertragung der an Bord benötigten Energie auf das Fahrzeug.

Diese Aufgaben werden mit dem im folgenden beschriebenen Regelkonzept gelöst, siehe Abbildung 10. Da sich mehrere Shuttles zur selben Zeit auf dem gleichen Statorabschnitt befinden können, ist es nicht möglich, bei der Speisung des Stators Belange der einzelnen Shuttles zu berücksichtigen. Deshalb wird die Statorwicklung mit einem Strom fester Amplitude gespeist, dessen Frequenz sich nach der gewünschten Geschwindigkeit und dem Bedarf der Shuttles an Bordenergie richtet.

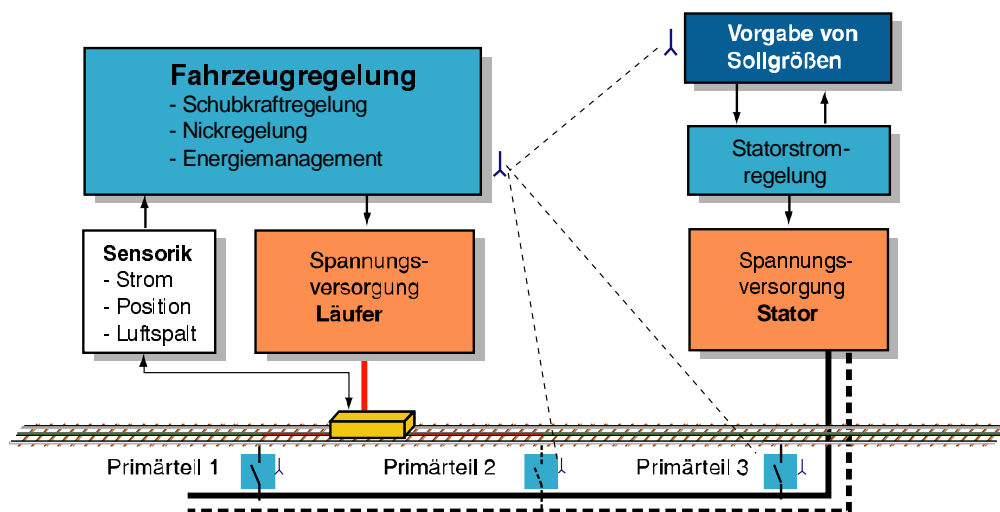


Abbildung 10: Gesamtkonzept der Antriebsregelung

Die Stator-Speisespannung stellt sich dann abhängig von der Frequenz und abhängig davon ein, wie viele Shuttles sich gerade auf dem Streckenabschnitt befinden und welche Kräfte sie erzeugen.

Die oben aufgezählten, fahrzeugspezifischen Aufgaben müssen somit auf den Fahrzeugen durch Beeinflussung der Läuferströme gelöst werden. Im Interesse möglichst kleiner Ströme und Verluste ist es nun zunächst sinnvoll, die Ströme so einzustellen, dass das Läuferfeld dem Ständerfeld zum Antreiben um 90° nach-eilt, zum Bremsen um 90° voraus-eilt. Die Frequenz und die Amplituden der beiden Läuferströme eines Shuttles ergeben sich dann aus den Sollwerten für die Vortriebs- bzw. Bremskraft, für das die Nickbewegung stabilisierende Drehmoment und für die vom Bordnetz angeforderte Leistung folgendermaßen:

- Da die Horizontalkräfte der beiden Läufer gleichsinnig zum Treiben und Bremsen beitragen, richten sich beide Stromamplituden in gleicher Weise nach dem Sollwert für die Tangentialkraft.
- Da die Vertikalkräfte der beiden Läufer die Nickbewegung gegensinnig beeinflussen, beeinflusst der Sollwert des Nickdrehmoments die beiden Läuferstromamplituden gegensinnig.
- Der Sollwert für die dem Bordnetz zuzuführende Energie bewirkt eine Anhebung sowohl der Ständerfrequenz als auch der Läuferfrequenz.

Abbildung 11 zeigt, wie die Stromsollwerte für die beiden Läuferwicklungen eines Fahrwerks aus den Stellgrößen des Schubkraftreglers und des Nickmomentreglers gebildet werden. Im Bild nicht dargestellt ist eine Maßnahme, die zur Entkopplung der beiden Regelkreise eingesetzt wird.

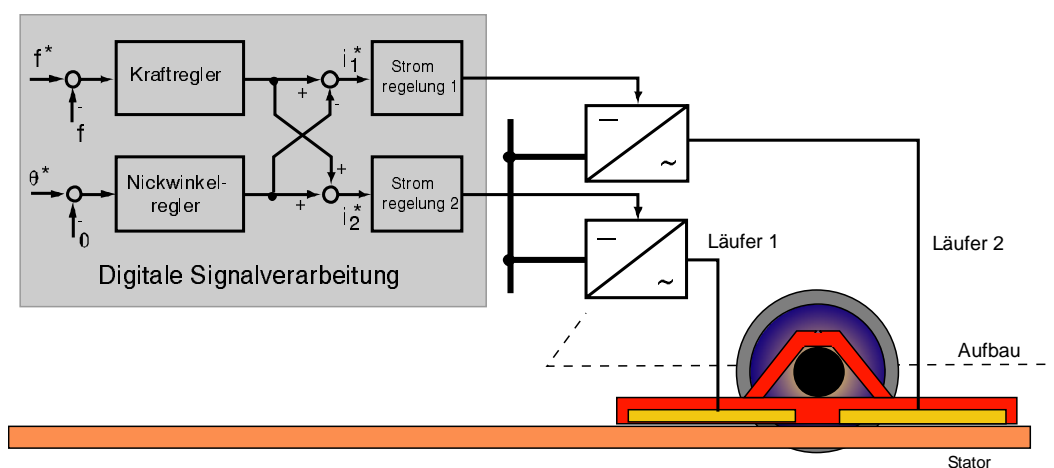


Abbildung 11: Konzept für die Läuferstromregelung

Die angeführte Regelstruktur ist an einem 8 m langen Prüfstand für Linearantriebe realisiert worden. Abbildung 12 stellt beispielhaft das Ergebnis der Nickwinkelregelung dar. Bis zum Zeitpunkt $t = 6$ s ist die Regelung noch ausser Betrieb, und der Läufer befindet sich in einer Anschlagposition. Nach dem Aktivieren der Regelung bewegt sich der Läufer in die horizontale Lage und der Nickwinkel θ bleibt im Bereich von ± 0.5 mrad.

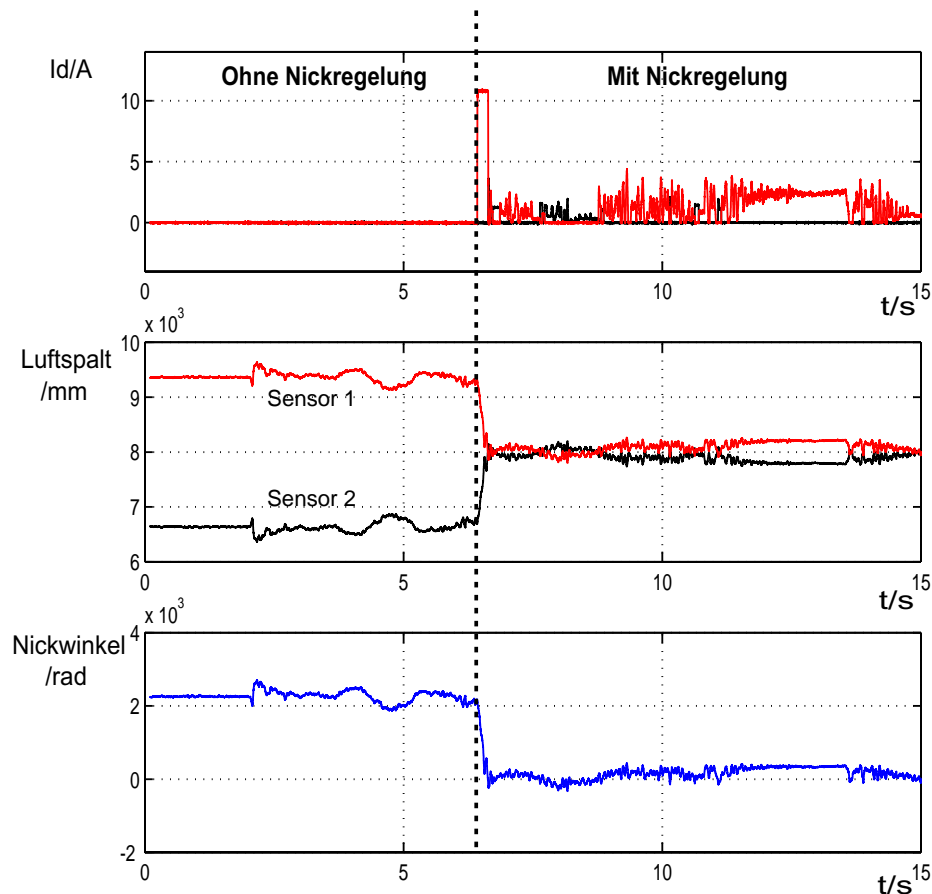


Abbildung 12: Experimentelles Ergebnis der Nickwinkelregelung

3 Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellte Konzeption einer Probestrecke für das Forschungsprojekt Neue Bahntechnik Paderborn bietet die Möglichkeit, alle wesentlichen Merkmale des Bahnsystems vom Linearantrieb über das vollaktive Fahrwerk bis hin zu Fahrmanövern unter Laborbedingungen zu untersuchen. Der Einsatz einer Vielzahl von Sensoren und Aktoren ermöglicht es, Untersuchungen zur Optimierung des Gesamtsystems und zur technischen Machbarkeit auf breiter Ebene durchzuführen. Die Validierung der erarbeiteten theoretischen Grundlagen und die Übertragung der an den Prüfständen für einzelne Module gewonnenen Erkenntnisse auf das Gesamtsystem stellen den Hauptteil der Arbeit an der Versuchsstrecke dar.

Literatur

- [Bac00] Bachmann, Hans: Feste Fahrbahn – Anwendungsorientierte Systemlösung für den Bahnfahrweg. In: VDEI: BahnBau. Fachtagung und Firmenpräsentation für Gleis- und Tiefbau, Hochbau und Ingenieurbau, Betriebsführung, Leit- und Sicherungstechnik bei den Eisenbahnen, Berlin 2000, S. 27-30
- [Bög00] Bögl: Fortschritt baut man aus Ideen. Informationsschrift der Fa. Bögl
- [DS804] Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke. DS 804, 1993
- [Fie99] Fiedler, Joachim: Bahnwesen – Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen. Werner-Ingenieur-Texte, Düsseldorf, 4. Auflage, 1999
- [Für93] Fürst R.: Anwendungsnahe Dimensionierung und messtechnische Überprüfung von Langstator-LinearMotoren für Magnetschnellbahnen, Diss. TU Berlin, 1993
- [Hen99] Henke M., Grotstollen H.: Regelung eines Langstator-LinearMotors für ein spurgeführtes Bahnfahrzeug. SPS/IPC Drives'99, Nürnberg, 1999, S. 775-782
- [Lei70] Organ der Studiengesellschaft „Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge“ e.V.: Lastannahmen und Sicherheiten für Schienenfahrzeuge. 14. Jahrgang, Sonderheft II, Augsburg, 1970
- [Lin81] Lingaya S., Wiechens H.: Die Streckenschaltanlage für den Antriebs des TRANSRAPID 06, Elektrische Bahnen 1981, Heft 8
- [Rhe00] GTS: Rheda 2000 – Die monolithische Feste Fahrbahn mit Direktaufbau auf HGT. Informationsschrift der Fa. German Track Systems Projektgesellschaft mbH