

KONSTRUKTION UND REALISIERUNG EINES MODULAREN 3D-FÄHIGEN LINEARMOTORS MIT SOFT MAGNETIC COMPOSITE STATORELEMENTEN

Q. Maurus

1 EINLEITUNG

In den heutigen Produktionslinien werden unter anderem Förderbänder und Kettenantriebe zur Beförderung von Stück- bzw. Schüttgut eingesetzt. Diese Transportsysteme sind häufig Platz raubend, langsam und in der Umrüstung, die bei Änderungen in der Produktionslinie notwendig ist, unflexibel. Daher sind zur Produktivitätssteigerung flexible, hochdynamische und kompakte Transportsysteme notwendig. Zusätzlich können Rüstzeiten bei getakteten Prozessen reduziert werden, wenn Arbeitsstationen softwaregesteuert in die Produktionslinie aufgenommen oder aus ihr entfernt werden.

Aufgrund ihrer hohen Dynamik und hohen Positioniergenauigkeit werden Direktantriebe in der Industrie für Bestückungsautomaten eingesetzt. Die hier eingesetzten Antriebe besitzen in der Fortbewegung jedoch nur einen Freiheitsgrad, so dass für mehrdimensionale Bewegungen mehrere Linearmotoren gekoppelt werden müssen. Der Bewegungsraum ist aufgrund dieser Kopplung stark beschränkt, so dass nur ein lokaler Einsatz möglich ist. Reine Linearmotoren eignen sich daher nur dann für ein flexibles Transportsystem, wenn ihre Charakteristik diesbezüglich verbessert wird.

In den letzten Jahren ist am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB) der Technischen Universität Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem Institut für Stromrichtertechnik (SRT) der Technischen Universität Darmstadt ein Linearantrieb entwickelt, realisiert und in Betrieb genommen worden, der auf einer ausgedehnten dreidimensional gekrümmten Fahrbahn verkehren kann. Weitere Informationen zu Transportsystemen mit ähnlichen Konzepten sind in [1] dargestellt.

2 ANFORDERUNGEN

Fahrzeuge ohne Schleppkabel ermöglichen zum einen das Befahren ausgedehnter Strecken und zum anderen unabhängig voneinander operierende Fahrzeuge, die softwaregesteuert ihr Gut zu den einzelnen Arbeitsstationen befördern. Der Einsatz derartiger passiver Fahrzeuge führt unweigerlich zu einer Langstatoranordnung. Folglich kann ein Höchstmaß an Flexibilität der Streckenführung nur mit einem modular aufgebauten Stator erreicht werden. Ein sich an die Krümmung der Strecke anpassender Stator führt jedoch am starren Aktivteil des Fahrzeugs zu einem variierenden Luftspalt, wobei der Bereich der Variation durch eine Segmentierung des Fahrzeugs verkleinert werden kann.

Mit einer in Abschnitte unterteilten Fahrstrecke können einerseits die unterschiedlichen Funktionen, wie Präzisions- und Beschleunigungsfahrt sowie das Befahren dreidimensional gekrümmter Kurven, realisiert werden. Andererseits ermöglicht die Modularität eine größere Flexibilität in der Streckenführung. Um die Konkurrenzfähigkeit zu den vorhandenen Transportsystemen zu wahren, sind Fertigungsverfahren zu bevorzugen, die die Herstellungskosten in einem akzeptablen Rahmen halten.

3 GEWÄHLTES MASCHINENKONZEPT

Bei der Auswahl des Maschinenkonzeptes ist der vom variierenden Luftspalt abhängige Schub entscheidend. Weiterhin schränkt die Forderung nach einem passiven Fahrzeug die möglichen Maschinenkonzepte ein. Basierend auf den Untersuchungen einer Vorstudie [2], in der mehrere Konzepte miteinander verglichen wurden, fällt die Wahl auf eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit Einzelzahnwicklung ([3], [4], [5]). Die Elementarmaschine besteht aus 12 Statorzähnen, denen 10 Magnete gegenüberstehen.

Der Langstator kann der Kurvengeometrie am besten folgen, wenn die Segmentierung des Stators bis hinunter zum einzelnen Zahn möglich ist. Dies führt zu einer hohen Stückzahl von identischen Statorelementen, die gelenkig zu verbinden sind. Die Integration dieser formschlüssigen Verbindung führt zu einer komplexen Form des Statorelements, die durch das Laminieren von Blechen nur ungenügend abgebildet werden kann. Daher bietet sich die Verwendung von Soft Magnetic Composites (SMC) Pulvermaterialien an. Die Form wird in einem Pressvorgang hergestellt. Die magnetischen und mechanischen Eigenschaften werden über eine nachgeschaltete Wärmebehandlung definiert. Die hohen Kosten für das Presswerkzeug werden durch die hohe Stückzahl aufgefangen, wodurch eine Kostenersparnis gegenüber dem Laminieren erreicht wird. Die resultierende Dichte in einem kaltverpressten Prozess mit einem Pressdruck von 800 MPa beträgt ca. $7,2 \text{ g/cm}^3$. Weitere Informationen zu den SMC-Materialien sind unter [6] erhältlich. In **Bild 1** ist ein Statormodul bestehend aus 12 Elementen und sechs Spulen dargestellt. Im Joch des Statorelements ist zwischen zwei Elementen ein kleiner Luftspalt erkennbar, der für die notwendige Beweglichkeit des Stators in räumlich gekrümmten Streckenabschnitten erforderlich ist.

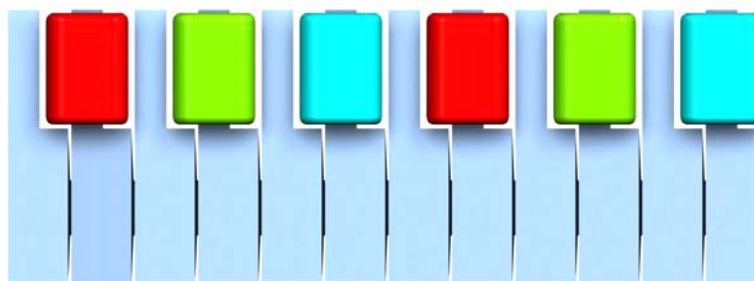


Bild 1: Statormodul mit sechs Einzelzahnspulen

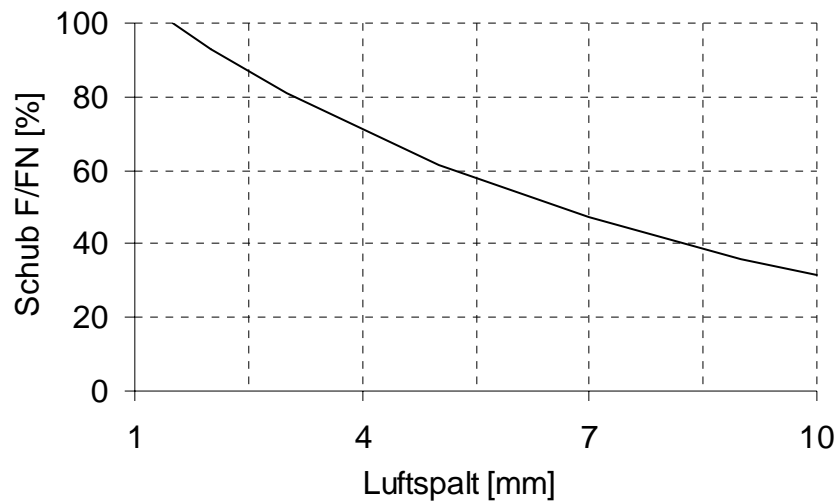


Bild 2: Schubausbeute der gewählten Maschine

Die Segmentierung des Fahrzeugs beschränkt sich auf eine einmalige Teilung, wodurch der Luftspalt auch bei relativ engen Radien auf 10 mm begrenzt wird. **Bild 2** zeigt die Schubausbeute der gewählten Maschine über den Bereich des zulässigen Luftspalts.

Die wichtigsten Kenndaten der Maschine sind in **Tabelle 1** aufgelistet.

Tabelle 1: Kenndaten der Maschine

Merkmal	Wert
Anzahl der Pole	10
Polteilung	24 mm
Magnethöhe	8 mm
Länge des Translators	240 mm
Jochmaterial des Translators	ST52
Luftspalt	1 ... 10 mm
Anzahl der Statorzähne	12
Nutteilung	20 mm
Statormaterial	Somaloy® 500

4 KONSTRUKTION

Der aufgrund der Segmentierung flexible Langstator ist aus Einzelzähnen zusammengesetzt. Das Design des Einzelements integriert sowohl das für die Verbindung notwendige Gelenk, bestehend aus einer Kugel und einer kugelförmigen Kalotte, als auch die Begrenzungen für das Verdrehen und Verkappen zweier Elemente. Das gewählte Motorprinzip benötigt nur auf jedem zweiten Zahn eine Spule. Die Verschaltung ist dreiphasig ausgeführt. Aufgrund der permanentmagnetischen Erregung entstehen hohe magnetische Normalkräfte, die im flexiblen Konzept des Stators zu berücksichtigen sind. Die notwendige Steifigkeit kann nur durch das Fixieren des zuvor ausgerichteten Langstators erreicht werden. Weiterführende Informationen befinden sich in [7]. **Bild 3** zeigt das CAD-Modell eines gebogenen Statormoduls, das an den Streckenverlauf eines An- bzw. Abstiegs angepasst ist.

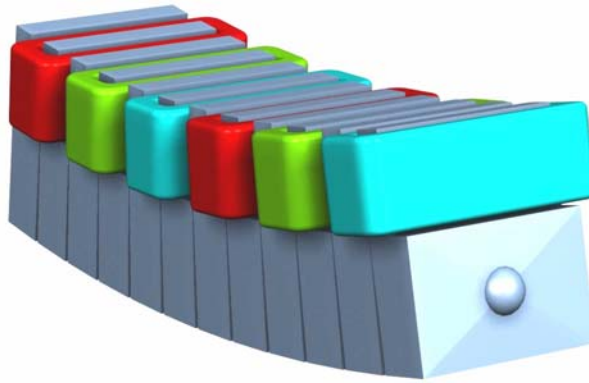


Bild 3: Statormodul für einen An- bzw. Abstieg

Das gewählte Maschinenkonzept in Verbindung mit dem segmentierten Langstator ermöglicht den Aufbau des dreidimensional gekrümmten Streckenverlaufs. Zur experimentellen Überprüfung dieses Konzepts ist die Konstruktion einer Teststrecke notwendig, welche als geschlossenes Oval mit verschiedenen Funktionsabschnitten ausgeführt ist. Integriert sind ein Beschleunigungs- und ein Präzisionsfahrabschnitt sowie zwei 180° Kurven mit Überhöhung, die die neue Funktionalität des Linearmotors, einen dreidimensionalen Streckenverlauf befahren zu können, nachweisen. Die Doppelkammanordnung im Beschleunigungsabschnitt der Strecke erlaubt eine Verdoppelung des Schubs, während im Präzisionsabschnitt mit Hilfe eines optischen Wegsensors eine exakte Positionierung des Fahrzeugs auf wenige zehn Mikrometer genau ermöglicht wird. In **Bild 4** ist das CAD-Modell der vollständigen Strecke dargestellt.

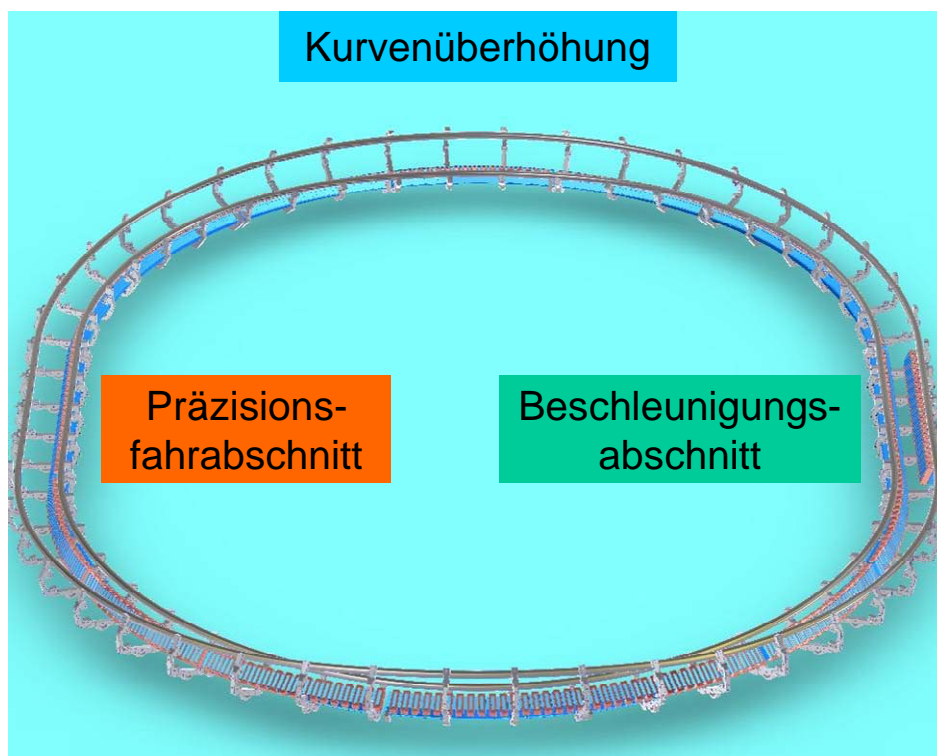


Bild 4: CAD-Modell der Teststrecke

Im CAD-Modell erkennbar ist das Zweirohrsystem, welches zum Führen und Tragen des Fahrzeugs benötigt wird. Die Verbindung des Stators mit diesen Rohren und dem Untergrund

erfolgt über Aluminium-Gusshalter. Darüber hinaus stellen diese Halter kontinuierlich die Spurbreite in kurzen Abständen ein. Erforderlich ist dies insbesondere in den Kurvenüberhöhungen, da dort die Herstellung eng tolerierter gebogener Rohre problematisch ist. Des Weiteren stellt diese Art der Befestigung der Halter mit den Rohren eine Verstärkung der Streckenabschnitte dar. Das Fixieren der Halter mit dem Untergrund übernimmt ein geschweißter Fuß, der zusätzlich das Einstellen des Gusshalters in der Höhe und im Winkel in bestimmten Grenzen ermöglicht. Die Befestigung zeigt das CAD-Modell in **Bild 5**.

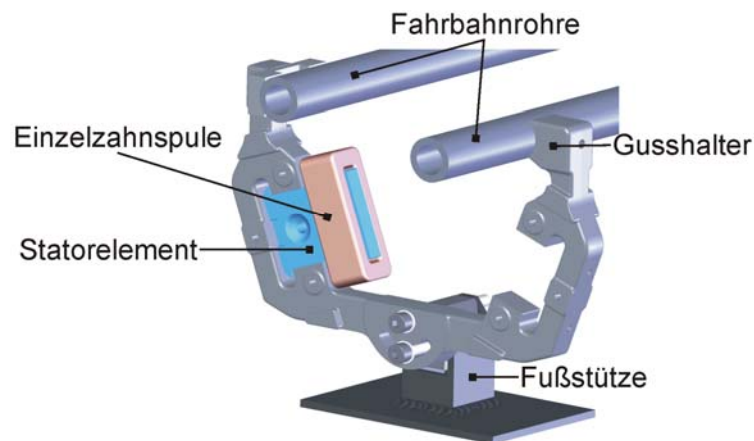


Bild 5: Befestigung der Streckenabschnitte

Während enge Toleranzen bei der Fertigung dreidimensional gekrümmter Rohre schwierig zu realisieren sind, ist dies aufgrund des Pressvorgangs bei der Herstellung der Statorelemente unproblematisch. Jedoch treten im Gegensatz zu den werkzeuggebundenen Maßen größere Toleranzfelder bei den Maßen in Pressrichtung auf. Auch wenn die Abweichung innerhalb einer Presscharge deutlich geringer ist, summieren sich diese bei der Stapelung der Elemente zu einem Langstator auf. Daher berücksichtigt das Konzept der Strecke die größtmögliche Länge des Langstators. **Bild 6** zeigt den Toleranzausgleich über einen zusätzlichen Halter, der den Stator in einem Kurvenabschnitt nach 36 und in einem geraden Abschnitt nach 48 Elementen mit dem nächsten Gusshalter verbindet.

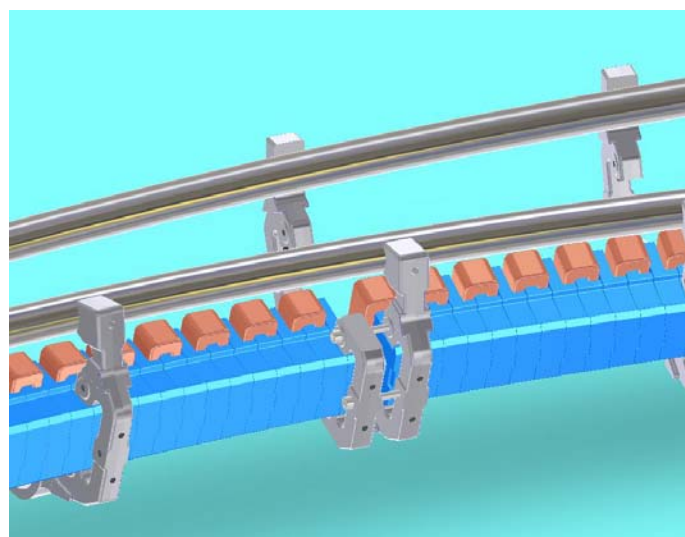


Bild 6: Toleranzausgleich des Langstators

Die Fahrzeugkonstruktion berücksichtigt einerseits die in Kapitel 2 beschriebenen Anforderungen und muss andererseits gewährleisten, dass keine Berührung zwischen Translator und Stator auftritt. Weiterhin erfordert die Doppelkammeranordnung des Stators im Beschleunigungsabschnitt jeweils zehn Permanentmagnete, die am Fahrzeug auf beiden Seiten parallel angeordnet sind. Darüber hinaus vereinfacht das Konzept eines passiven Fahrzeugs die Fahrzeugkonstruktion, da keine Versorgungs- und Sensorkabel berücksichtigt werden müssen. Die zu befördernden Güter werden über eine gelenkig verbundene Trägerplatte auf dem Fahrzeug transportiert. Des Weiteren ist der Linearmaßstab des optischen Messsystems mit dieser Platte verbunden. Sowohl die Funktion des Führens als auch die des Tragens erfolgt über Laufrollen. Die horizontal montierten Führungsrollen garantieren einen ausreichenden Luftspalt zwischen Translator und Stator und gleichen die zwischen den Gussaltern der Strecke auftretende Spurbreitenvariation aus. Dies geschieht, indem die Rollen auf einer Seite des Stators fest und auf der gegenüberliegenden Seite elastisch befestigt werden. Das Fahrzeug ist zweigeteilt ausgeführt, wodurch sich der maximal auftretende Luftspalt reduziert. Die Verbindung der Fahrzeughälften erfolgt über ein Kugelgelenk. Die Frontalansicht des 3D-Modells von Fahrzeug und Beschleunigungsstrecke ist in **Bild 7** dargestellt.

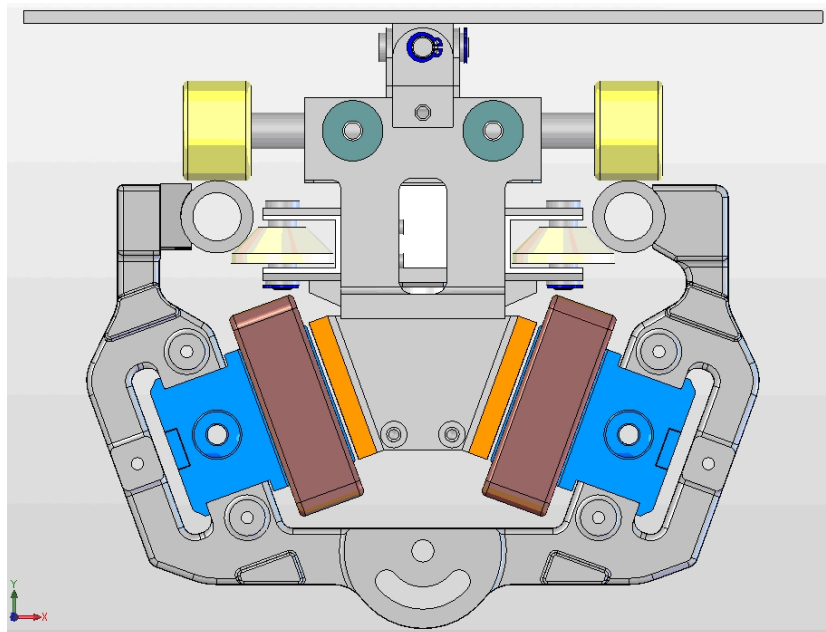


Bild 7: Fahrzeug im Beschleunigungsabschnitt

5 TESTAUFBAU

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, sind inzwischen zwei komplette Teststrecken mit mehreren Fahrzeugen an der TU Braunschweig gefertigt worden. Eine Strecke befindet sich im Maschinenlabor des IMAB und eine im SRT, das die Versorgung und Regelung des 3D fähigen Linearmotors entwickelt hat.

Zum Einsatz kommen zwei verschiedene Einzelzahnspulen, welche sich im Querschnitt und in der Windungszahl unterscheiden. In der Beschleunigungsstrecke speist ein gemeinsamer

Wechselrichter aufgrund der Doppelkammanordnung zwei parallel geschaltete Statormodule. Die Spulen mit höherer Windungszahl reduzieren hier den Strombedarf, wodurch sich die Anzahl an Wechselrichtern unterschiedlicher Leistungsklassen reduziert. Zwei für den Beschleunigungsabschnitt fertig konfektionierte Statormodule zeigt **Bild 8**.



Bild 8: Statormodule für den Beschleunigungsabschnitt

Nach Abschluss der Richtarbeiten an den gebogenen Fahrbahnrohren der Kurvenüberhöhungen liegt das Toleranzfeld der Spurbreitenvariation in dem geforderten Bereich von ± 1 mm. Der Langstator folgt in guter Übereinstimmung dem vorgegebenen Kurvenverlauf der Teststrecke. Lediglich in den Toleranzausgleichsbereichen ist eine leicht erhöhte Abweichung festzustellen. Das Fixieren des Stators in der ausgerichteten Position erfolgt mit Epoxydharzkleber, wobei die aufgrund der magnetischen Normalkräfte erforderliche Steifigkeit durch das zusätzliche Einlegen von Glasfasermatten erreicht wird. Einen Kurveneingang der Teststrecke zeigt **Bild 9**.



Bild 9: Kurveneingang der Fahrstrecke

Die Sensorköpfe des optischen Messsystems befinden sich in den Abschnitten mit Doppelkammanordnung, so dass hier sowohl Präzisions- als auch Beschleunigungsfahrten stattfinden können. In den restlichen Abschnitten wird das Fahrzeug mit sensorlosen Regelungsmethoden betrieben.

Die Konstruktion des Fahrzeugs teilt sich von unten nach oben in drei Bereiche. Unten besitzt das Fahrzeug einen Bereich mit geteiltem Eisenrückschluss, Kugelgelenk und den Magneten. Anschließend kommt der Fahrwerksbereich mit den Laufrollen und darüber sind die Trägerplatte und der Linearmaßstab angebracht. Die Zweiteilung des Eisenrückschlusses führt aufgrund der Schmierung des Kugelgelenks zu zwei Luftspalten. Weiterhin verändert sich, je nach Stellung der zwei Drehgestelle, die Polteilung der das Gelenk umgebenden Magnete. Diese Veränderungen im Magnetkreis sind jedoch marginal und wirken sich praktisch nicht auf die geforderte Funktionsweise des Antriebs aus. Der aufgrund der Auslenkung variierende Magnetabstand ist in **Bild 10** deutlich zu erkennen, auch wenn das Kugelgelenk hier ohne Magnete dargestellt ist.

Die Fahrwerkskonstruktion nimmt acht Schrägrollen für die Führung und sechs Laufrollen zum Tragen auf. Letztere sind über Linearlager in der Höhe verstellbar, so dass der Luftspalt zwischen Fahrzeug und Stator in bestimmten Grenzen einstellbar ist. Das bis auf die Magnete und die Tragplatte vollständig montierte Fahrzeug ist in **Bild 11** dargestellt.



Bild 10: Kugelgelenk des Fahrzeugs



Bild 11: Fahrzeug ohne Trägerplatte und Magnete

6 BETRIEBSVERHALTEN UND MESSUNGEN

Sowohl am IMAB der TU Braunschweig als auch am SRT der TU Darmstadt wurden die Testanlagen erfolgreich in Betrieb genommen. Es zeichnet sich ab, dass die Laufrollen bereits nach kurzer Zeit Abrieb aufweisen, insbesondere bei den Tragrollen verringert sich dieser jedoch nach einer Einlaufzeit deutlich. In diesem Zusammenhang finden Untersuchungen bezüglich der Laufeigenschaften mit unterschiedlichen Ausführungen des Fahrwerks (siehe [8]) und unterschiedlichen Materialien für die Laufrollen am IMAB statt.

Die Ermittlung der Materialeigenschaften des verwendeten SMC-Materials erfordert sowohl für die Messung der Zugfestigkeit als auch für die Ermittlung der B/H-Kurve geeignete Probekörper. Aufgrund des spröden Charakters werden diese Probekörper für die Ermittlung von Datenblattangaben nicht spanabhebend hergestellt, sondern gepresst. Für erste qualitative Aussagen erfolgten dennoch am IMAB Messungen mit aus den Statorelementen herausgeschnittenen Proben. Das Ergebnis der Zugversuche zeigt **Bild 12**. Die mittlere Zugfestigkeit erreicht mit 20 N/mm² ungefähr 80 % der Datenblattangabe.

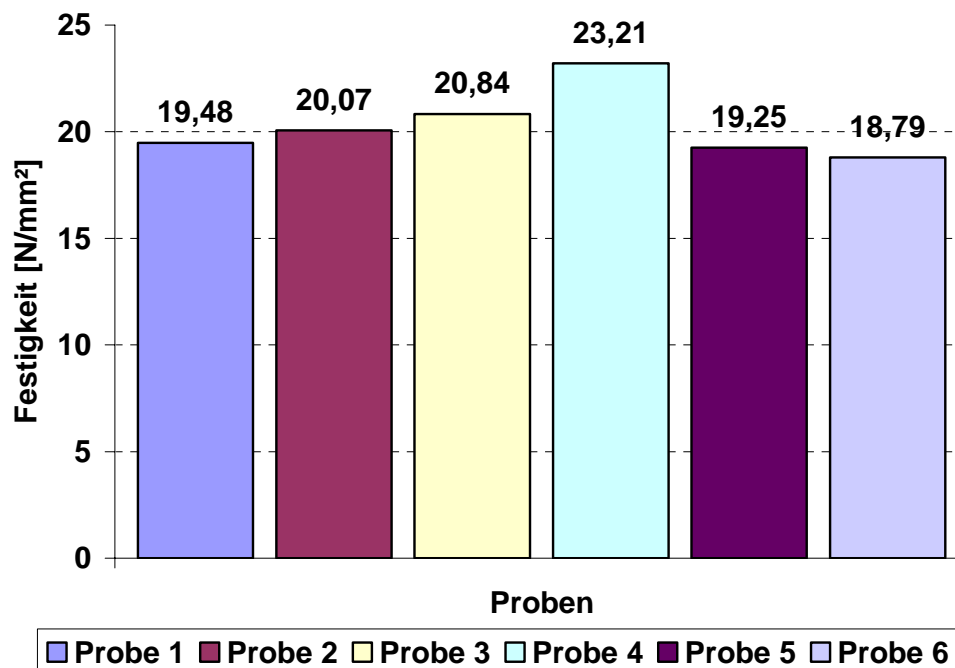


Bild 12: Zugfestigkeit der spanabhebend bearbeiteten Probekörper aus SMC

Bei der mit den Proben ermittelten B/H-Kurve lagen die Messwerte in einem Bereich von 10 % unterhalb der Datenblattkennlinie. Die geringeren Werte liegen in dem erwarteten Bereich, da sich aufgrund der Bearbeitung Mikrorisse im Probekörper bilden. Daher wurde ein zweiter Ansatz verfolgt, die Eigenschaften des SMC-Materials indirekt über eine Schubkraftmessung zu überprüfen. Für diese Schubkraftmessung wurde ein nahezu reibungsfreier Versuchsaufbau erstellt, bei dem originale d. h. unbearbeitete Statorelemente verwendet wurden. In diesem Aufbau konnten die mit Hilfe von Finite-Elemente-Programmen berechneten Schubkraftwerte mit fast exakter Überstimmung nachgewiesen werden.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der TU Braunschweig wurde ein neuartiger Linearmotor für den industriellen Einsatz als Transportsystem entworfen, konstruiert und hergestellt. Die erweiterte Funktionalität, auf ausgedehnten dreidimensional gekrümmten Fahrstrecken verkehren zu können, wird durch den Einsatz passiver Fahrzeuge und einen an die Kurvengeometrie anpassbaren Stator erreicht. Letzteres ist erst durch die Verwendung von SMC-Material möglich, da sowohl die Formgebung der Einzelzähne als

auch die gegenüber Laminieren geringeren Kosten die Presstechnologie attraktiv machen. Die Untersuchungen bezüglich der Schubkraft und die gesammelten Erfahrungen während des Betriebs konnten die gute Eignung des Statormaterials belegen. Darüber hinaus konnte das Institut für Stromrichtertechnik der TU Darmstadt einen zuverlässigen sensorlosen Fahrzeugbetrieb realisieren (siehe [9]). Im weiteren Projektverlauf sind der Mehrfahrzeugbetrieb und die Implementierung weiterer Streckenabschnitte geplant.

LITERATUR

- [1] J. Hoffmann, Q. Maurus: *Entwicklung neuer Transportkonzepte in der Industrie mit Hilfe von Linearmotoren*,
Jahresbericht des IMAB, TU Braunschweig, 2007
- [2] W.-R. Canders, H. Mosebach, Z. Shi, P. Mutschler, J. Weigel, H. Lamsahel: *Neue Funktionalitäten von Linearantrieben*,
Abschlussbericht zum FVA Forschungsvorhaben Nr. 445 Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 692, 2003
- [3] J. Cros, Ph. Viarouge: *Synthesis of High Performance PM Motors with Concentrated Windings*,
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 2, June 2002, pp. 248-253
- [4] G. Huth: *Permanent-Magnet Excited AC Servo Motors in Tooth-Coil Technology*,
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, June 2005, pp. 300-307
- [5] W.-R. Canders, P. Hoffmann, H. Mosebach, G. Tareilus: *Large High Performance Linear Drive with High Overload Capability and Very Small Thrust Ripple*,
LDIA 2007, September 2007, Lille, France
- [6] Firmenbroschüre: *Somaloy® Technology for Electrical Motors*
Höganäs AB, Schweden, www.Hoganas.com
- [7] C. Löffler, Q. Maurus: *Entwicklung eines Fahrwerks für einen 3D-Linearantrieb*,
Jahresbericht des IMAB, TU Braunschweig, 2008
- [8] W.-R. Canders, C. Löffler, Q. Maurus, P. Mutschler, M. Mihalachi: *Modulares Linearantriebssystem für räumlich gekrümmte Bahnen und Mehrfahrzeugbetrieb*,
Abschlussbericht zum FVA Forschungsvorhaben Nr. 445/II Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2009
- [9] M. Mihalachi, R. Leidhold, P. Mutschler: *Control of Segmented Long Primary Linear Drives*,
LDIA 2009, September 2009, Incheon, Korea