

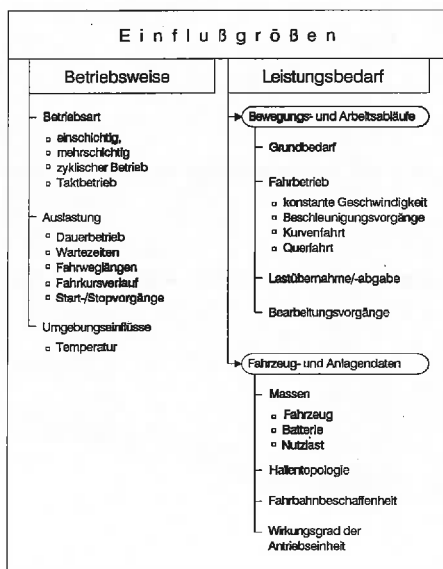
Leistungs- und Energiebedarf von Fahrerlosen Transportsystemen

WILLIBALD A. GÜNTNER, WILFRIED KLEIN

Für die Projektierung von FTS-Anlagen ist bereits im Planungsstadium der Energiebedarf und damit die erforderliche Motor- und Batteriegröße zu ermitteln und festzulegen. Dazu ist eine Vielzahl anlagen- und fahrzeugspezifischer Einflußgrößen zu berücksichtigen. Der folgende Beitrag beschreibt die analytische und meßtechnische Bestimmung der einzelnen Parameter und die computerunterstützte Verarbeitung mit Hilfe eines Rechenprogramms.

Batteriebetriebene FTS werden aufgrund ihrer Flexibilität in den letzten Jahren in den unterschiedlichsten Branchen eingesetzt. Vom fahrerlosen Gabelhubwagen über Trägerfahrzeuge aller Art bis hin zu mobilen Montageplätzen bieten sie vielfältige Möglichkeiten, Lasten zu übernehmen, zu transportieren und abzugeben. In meist hochautomatisierten Lager- und Warenverteilbereichen sowie in Montage- und flexiblen Fertigungsbetrieben sind sie damit ein wichtiger Bestandteil der physischen Logistik.

Die durchwegs hohe Komplexität dieser Einsatzgebiete erfordert an die Planung und Auslegung dieser Flurfördermittel höchste Ansprüche. Eine Hauptaufgabe besteht darin, den Energiebedarf und damit die erforderliche Motor- und Batteriegröße genauestens zu ermitteln. Ein zu groß dimensionierter Antrieb und eine nicht erforderliche Batteriekapazität verschlechtern in hohem Maße das Verhältnis Gesamtfahrzeuggewicht zu Nutzlast und damit auch den Preis des Fahrzeugs. Eine genaue Dimensionierung muß allerdings auch die hohen Ansprüche an die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit dieser Fördermittel erfüllen, nachdem sie fast immer in hochautomatisierten und damit sehr teuren Anlagengebieten eingesetzt sind. Die bekann-



1: Einflußgrößen auf den Energiebedarf von FTS

konst. Fahrgeschwindigkeit	Beschleunigung
$\frac{m_{ges} \cdot g \cdot d_R \cdot \mu_R}{2 \cdot i \cdot \eta_{ant}}$	$\frac{a}{\eta_{ant}} \left[\frac{m_{ges} \cdot d_R}{2 \cdot i} + \frac{J_{rot} \cdot \omega}{d_R} \right]$
Es bedeutet:	
m_{ges}	Gesamtmasse (Fahrzeug, Batterie, Nutzlast)
d_R	Laufrollendurchmesser
μ_R	Rollreibungszahl (bei Vulkan-Lautrader: $\mu_R = 0,018 - 0,02$)
i	Gesamtübersetzung des FTS-Antriebes
η_{ant}	Gesamtwirkungsgrad des FTS-Antriebes
J_{rot}	Massenträgheitsmomente aller drehenden Teile des Antriebes, bezogen auf die Motorwelle

Tab. 1: Erforderliche Motormomente

ten Energieversorgungskonzepte mit häufig pauschaler Berücksichtigung der Einflußgrößen reichen in vielen Fällen dazu nicht mehr aus [1]. Erforderlich ist vielmehr eine genaue Erfassung der einzelnen Einflußgrößen nach Bild 1.

Analyse der Bewegungs- und Arbeitsläufe

Für die genaue Auslegung und Dimensionierung von FTS ist der Leistungsbedarf der einzelnen Verbraucher möglichst genau zu bestimmen:

Der Grundbedarf eines Fahrerlosen Transportsystems ergibt sich hauptsächlich aus dem Leistungsbedarf für den DC/DC-Konverter, die Sensorik-Kompo-

nenten, den Bordrechner, die Datenübertragung, eventuell die Beleuchtung und ist nach der konstruktiven Festlegung bekannt.

Die erforderliche Motorleistung für den Fahr- und Lenkantrieb hängt neben den geplanten kinematischen Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung von den Fahrzeug- und Anlagendaten ab. Das sind im einzelnen:

- Gesamtmasse des Fahrzeugs,
- Wirkungsgrad des Antriebs,
- Hallentopologie und
- Fahrbahnbeschaffenheit.

Der Leistungsbedarf für die Lastübernahme und -abgabe hängt von der gewählten Einrichtung ab. Hier sind die Nenndaten der Einzelkomponenten zu erfassen, z.B. für Rollenförderer, Kettenförderer oder die Hubeinrichtung.

Werden am FTS Bearbeitungsvorgänge (z.B. Montagehilfen u. a.) durchgeführt, sind ebenfalls die Leistungen der Einzelkomponenten maßgebend.

Der gesamte Energiebedarf des Systems zwischen zwei Ladevorgängen ergibt sich dann aus der Summe der einzelnen Verbraucherleistungen und der jeweiligen Einschaltdauer.

Berechnungsansätze

Für die einzelnen Fahrzustände lassen sich die erforderlichen Motormomente nach den Gleichungen der Tabelle 1 bestimmen.

Der Anteil für die zu beschleunigenden Drehmassen ist bei den verwendeten FTS-Antrieben relativ gering und wird zur Vereinfachung der Berechnung mit 5% angesetzt. Damit ergeben sich die erforderlichen Motormomente für die Beschleunigung zu

$$M_{erf} = \frac{m_{ges} \cdot d_R}{2 \cdot i \cdot \eta_{ant}} \left(g \cdot \mu_R + a \right) \cdot 1,05 \text{ [Nm]}$$

und für die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit zu

$$M_{erf} = \frac{m_{ges} \cdot d_R \cdot g \cdot \mu_R}{2 \cdot i \cdot \eta_{ant}} \text{ [Nm]}$$

Bei nicht ebenen Einsatzfällen ist entsprechend der Hallentopologie noch der Hangabtrieb zu berücksichtigen.

Nach Auswahl eines geeigneten Antriebes bestimmt man für die Auslegung der Batterie die Stromaufnahme für die einzelnen Fahrzustände und -abschnitte. Aus diesen Stromaufnahmen kann dann für den geplanten Fahrkurs und das vorliegende Auftragsprofil die notwendige Gesamtka-

Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wi.-Ing. W. A. Günthner ist an der FH Regensburg Professor für die Lehrgebiete Fördertechnik, Materialfluß und Logistik. Dr.-Ing. W. Klein ist Leiter der Systementwicklung des MBB-Produktbereichs Automatisierungstechnik

azität bestimmt werden, indem der jeweilige Bedarf mit der entsprechenden Anzahl oder Zeit multipliziert wird.

Messungen

Die Leistungsaufnahme der einzelnen Arbeits- und Bewegungsabläufe des FTS ist unter den beschriebenen Annahmen analytisch zu bestimmen. Allerdings sind manche Einflußgrößen, wie z. B. der Rollwiderstand oder die Leistungsverluste im Antriebsstrang, nur annähernd bekannt. Durch Messen des tatsächlichen Leistungsbedarfs eines FTS im Fahrbetrieb lassen sich genaue Aussagen für die jeweilige Fahrzeugvariante ermitteln und im Rückschluß die Unsicherheiten bei einer analytischen Betrachtung beseitigen.

Im Feldversuch werden an zwei verschiedenen FTS-Trägerfahrzeugen Leistungsmessungen durchgeführt [2]. Um eine bessere Grundlage für die Batterieauslegung und das Ladekonzept zu haben, wird gleichzeitig der genaue Zeitbedarf für die einzelnen Leistungen erfaßt. Der Fahrzeugtyp A besitzt als Lastübergabemittel eine Rollenbahn, der Fahrzeugtyp B eine Teleskopiervorrichtung.

Beide Fahrzeugtypen besitzen auf der Fahrzeuglängsachse zwei gelenkte Radnabenantriebe und sind damit voll flächenbeweglich (längs/querfahrend). Details sind der Tabelle II zu entnehmen.

Das Leergewicht setzt sich dabei aus dem gesamten Fahrzeuggewicht, einschließlich der Batterien und der Meßgeräte zusammen.

Die Gesamtstrommessung geschieht in dem realisierten Meßaufbau über einen elektrischen Nebenschlußwiderstand von 3×10^{-4} Ohm. Der Widerstand ist standardmäßig zur Batteriekapazitätskontrolle auf den Fahrzeugen vorhanden. Strom- und Spannungsverläufe zeichnet man mit Hilfe eines Speicheroszilloskops und eines Schreibers auf. Um eine Beeinflussung der Meßgrößen durch die Leistungsaufnahme der Meßmittel zu vermeiden, werden zwei separate 12 V Akkumulatoren mit nachgeschaltetem Umrichter (= 24 V/220 V) als Spannungsversorgung für die zusätzlichen Geräte eingesetzt. Bild 2 zeigt den Versuchsaufbau am Fahrzeugtyp A.

In den Tabellen III und IV ist der arithmetische Mittelwert der Stromaufnahme in den einzelnen Funktionsabläufen zusammengefaßt. Die Leistungsaufnahme wächst wie erwartet linear mit der Gesamtmasse des Fahrzeugs. Bei Ermittlung der Lei-

2: Versuchsaufbau am Fahrzeug



stungsaufnahme während der Beschleunigungsphasen ist der Einbruch der Batteriespannung zu berücksichtigen (Bild 3). Bedingt durch den maximalen Ausgangsstrom der Leistungssteller ergeben sich zudem in dieser Betriebsphase Unterschiede zwischen den errechneten und meßtechnisch bestimmten Leistungswerten. Abhängig von der Nutzlast streuen die Beschleunigungswerte und damit die Leistungsaufnahmen. Bild 4 und 5 zeigen den Stromverlauf bei einer orthogonalen Abzweigung (Kurvenfahrt) und beim Übergang von der Längsfahrt in die Quersfahrt. Die Stromspitzen werden ausgelöst durch die Lenkaktivitäten in diesen Fahrabläufen.

Ebenfalls von Bedeutung ist die genaue Kenntnis des Rollwiderstands. Er ist wirksam bei allen Fahrbewegungen und deswegen für die Energiebilanz besonders wichtig.

Batterieauslegung

In den meisten Fällen wird der Batterietyp durch die Betriebsweise der gesamten FTS-Anlage festgelegt. Beim Ein- und Zweischichtbetrieb plant man die Hauptladung der Batterien außerhalb der Schichtzeiten ein (zyklischer Betrieb). Zur mehrstündigen unterbrechungsfreien Abdeckung des Leistungsbedarfs kommen i. d. R. nur Bleibatterien in Betracht. Bleibatterien stellen bis 80% ihrer Nennkapazität zur Verfügung. In einem dreischichtigen Betrieb lassen sich dagegen aufgrund der fehlenden längeren Ladephasen nur NiCd-Batterien einsetzen (Ausnahme: Wechselbetrieb der Batterien). Sie sind für den Taktbetrieb geeignet, dabei wird nach kurzen Arbeitsintervallen der Fahrzeuge die entnommene Energie wieder zugeführt. Dies geschieht mit hohen Ladeströmen (bis zum zehnfachen des fünfständigen Entladestroms), so daß die Verweilzeit an der Ladestation kurz bleibt. Im Taktbetrieb darf den Batterien allerdings nur max. 30% ihrer Nennkapazität entnommen werden.

In jedem Falle muß die Tiefentladung einer Batterie und damit der Ausfall des Fahrzeugs verhindert werden. Beim MultiTrans Systems eines Herstellers wird der FTS-Systemleitreechner durch laufende Statusmeldungen der Fahrzeuge via Funk über die aktuelle verfügbare Restkapazität der Fahrzeugbatterie informiert und generiert bei einem Unterschreiten einer kriti-

Zuladung	- kg	100 kg	720 kg
Beschl. auf v = 1 m/s	17 A	18,5 A	23 A
Beschl. auf v = 0,5 m/s	10 A	-	-
Konst. mit v = 1 m/s	15 A	18 A	20 A
Konst. mit v = 0,5 m/s	10 A	13 A	15 A
Kurvenfahrt	12 A	12 A	14 A
Querfahrt	7 A	7 A	9 A

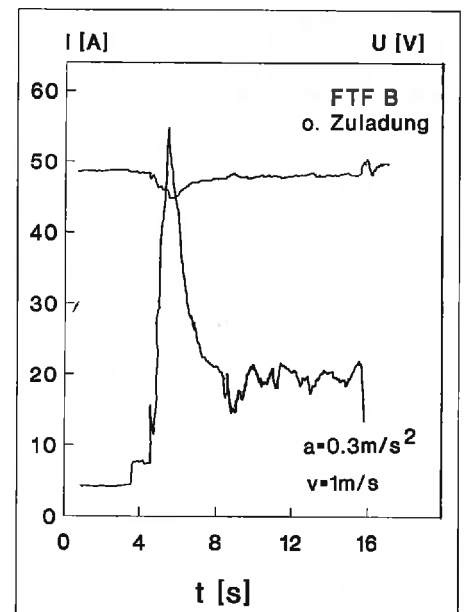
Tab. III: Stromaufnahme bei verschiedenen Fahrfunktionen, Beschleunigung a = 0,3 m/s², Fahrzeug Typ A

Zuladung	- kg	100 kg	720 kg
Fzg. A: Heben/Senken	32 A	34 A	34 A
Fzg. A: Querfahren	11 A	11 A	11 A
Fzg. B: Tischfahren	10 A	10 A	11 A
Fzg. B: Rollen	4 A	5 A	5 A

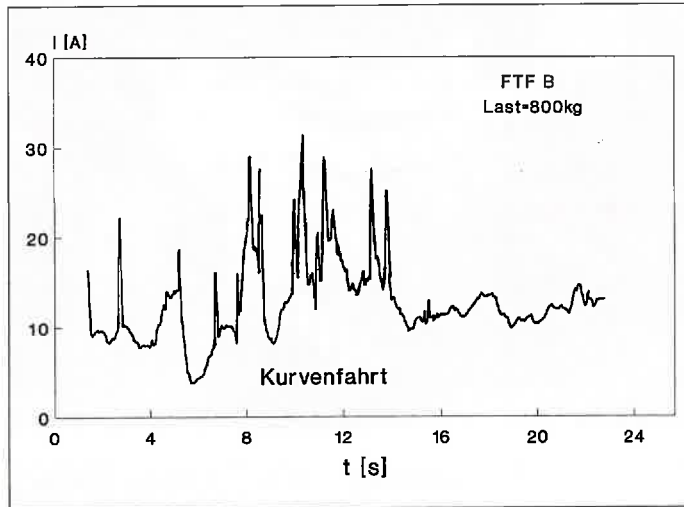
Tab. IV: Stromaufnahme bei verschiedenen Lastwechselfunktionen

Fahrzeug	Typ A	Typ B
Fahrmotor	2 x 600 W	2 x 1000 W
Lenkmotor	2 x 400 W	2 x 400 W
Lastwechsel	Querfahren	Querford.
	Rollen	400 W
	Heben	900 W
Leergewicht	1582 kg	1864 kg
Zuladung	720 kg	800 kg

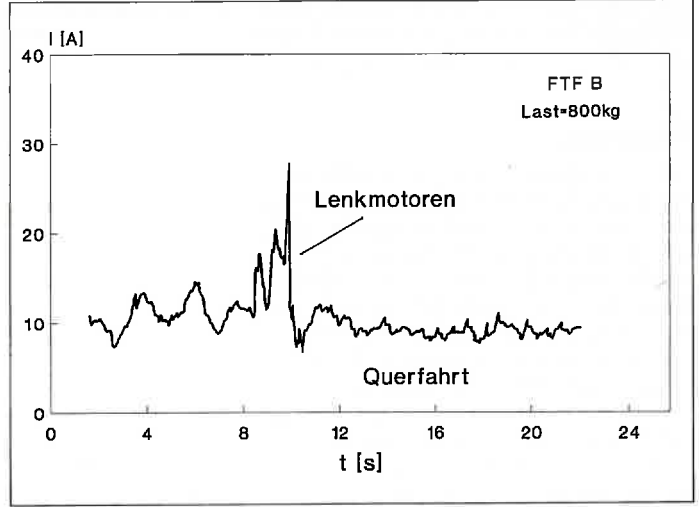
Tab. II: Daten der Fahrzeugtypen A und B



3: Strom- und Spannungsverlauf bei der Beschleunigung



4: Stromverlauf bei der Kurvenfahrt



5: Stromverlauf bei der Querfahrt

schen Schwelle für das betroffene FTS einen Fahrauftrag zur Ladestation.

Für die Dimensionierung der Batteriekapazität ist eine genaue zeitliche Bilanz der einzelnen Stromaufnahmen zwischen zwei Ladevorgängen erforderlich. Verschiedene Zeiteile sind fahrzeugspezifisch, andere sind abhängig von dem Fahrkurs-Layout, z. B. die Zeitdauer der Fahrtanteile mit konstanter Fahrgeschwindigkeit oder die Summe der Lastwechselzeiten (Bild 1).

Die Batteriekapazität ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$K_B = K_{\text{erf}} - \frac{t_{\text{ZL}} \cdot I_L}{k}$$

Darin sind:

- K_B – Batteriekapazität,
- K_{erf} – Kapazitätsbedarf aus der zeitlichen Strombilanz,
- t_{ZL} – Zwischenladezeit,
- I_L – mittlere Ladestromhöhe,
- k – Ladefaktor

Weitere Parameter, die das Programm berücksichtigt, sind der mittlere Entlade-

strom, die Betriebstemperatur und ein Sicherheitsfaktor.

Im Taktbetrieb ist die Länge der auftretenden Stillstandszeiten vom Ausnutzungsgrad der Fahrzeuge und den Dispositionsstrategien abhängig. Reichen die Stillstandszeiten für den Ladevorgang nicht aus, muß man mit höheren Ladeströmen arbeiten. Dies setzt aber eine größere Batteriekapazität voraus.

Der Batterietyp, die Batteriekapazität und die verfügbare Ladezeit sind Kriterien für die Auswahl des Ladegeräts und der Ladekennlinien.

Rechenprogramm

Das entwickelte Rechenprogramm zur Motor- und Batterieauslegung erfragt im Eingabeteil alle erforderlichen Daten. Für die häufig in den Projekten vorkommenden Werte schlägt das Programm Default-Werte vor, z. B. für die Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigung, Ladefaktoren etc. Strecken lassen sich dabei wahlweise in km oder m eingeben, Zeiten in Stunden, Minuten oder Sekunden. Alle Eingaben werden auf einer Datei abgelegt und stehen beim nächsten Programmlauf als Ausgangswerte zur Verfügung. Auf diese Weise läßt sich schnell der Einfluß verschiedener Parameter auf die Rechenergebnisse testen ohne Eingaben zu wiederholen. Ausgaben können optional auf verschiedene Medien durchgeführt werden.

Das Programm empfiehlt nach den Eingaben einen Batterietyp. Anschließend berechnet es die Leistungen für die Fahrtriebe sowie die Nennkapazität der Batterie und wählt mit Hilfe der Herstellerliste die Komponenten aus. Da sich durch die spezifischen Komponenten eine Änderung der Gesamtmasse des Fahrzeugs ergibt, wird der Rechnungsgang mit der Auswahl der jeweils nächsthöheren Batteriekapazitätsstufe und Motorenleistungsstufe solange wiederholt, bis sich keine Änderungen mehr ergeben (Konvergenzkriterium). Bild 6 zeigt das Strukturprogramm der allgemeinen Berechnung der Motor- und Batteriedaten.

Ergeben sich bei den allgemeinen Berechnungsmethoden ähnliche Antriebslei-

stungen wie bei den untersuchten Fahrzeugtypen A oder B, wird ein zweiter Durchlauf mit den meßtechnisch ermittelten Stromwerten durchgeführt.

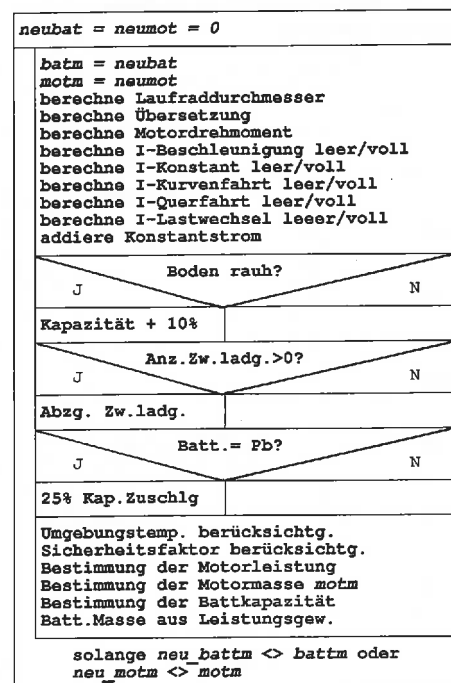
Zusammenfassung

Zur genauen Bestimmung des Leistungs- und Energiebedarfs von Fahrerlosen Transportsystemen sind sowohl die geplanten Bewegungs- und Arbeitsabläufe als auch die Fahrzeug- und Anlagendaten zu berücksichtigen. Mit zwei verschiedenen Trägerfahrzeugen wurden dazu die wichtigsten Parameter empirisch bestimmt. Die Auswahl des Batterietyps hängt stark von der Betriebsweise ab. Um trotz der Vielzahl der Einflußfaktoren auf das gesamte FTS-Energieversorgungskonzept Dimensionierungsfehler zu vermeiden und um schnell die Auswirkung von Parameteränderungen auf die Fahrzeug- und Batteriedaten zu erhalten, wurde ein Programm zur Motor- und Batterieauslegung entwickelt und beschrieben.

Literaturhinweise:

- [1] Steber M., Hermann M.: Batteriekonzepte für Fahrerlose Transportsysteme. Materialfluß (1991) Nr. 10, S. 82 bis 88
- [2] Brandl M., Steinkirchner F.: Untersuchung des Leistungsbedarfs von FTS-Fahrzeugen und Entwicklung eines Berechnungsprogramms als Grundlage für die Auslegung von Motoren und Batterie. Unveröffentlichte Studienarbeit an der FH Regensburg, 1991

Bildnachweis: Verfasser



6: Strukturprogramm der allgemeinen Berechnung