

FTS-Energiekonzepte Leitfaden für Hersteller und Betreiber von Mobiler Robotik

Dieser Leitfaden richtet sich an Hersteller und Betreiber von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) und beschreibt sinnvolle Energiekonzepte für mobile Roboter.



Herausgeber:

Forum-FTS (www.forum-fts.com)

Ausgabe: 27.07.2025, Version 0.7

erarbeitet durch den Arbeitskreis FTS-Sicherheit des VDI Fachausschuss FA309 „Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“

Autoren: Dieter Adolf Kölbel (LionTec / STARK Power), Karl Rapp (DS Automation),
Thomas Albrecht (FhG-IML), Dr. Günter Ullrich (Forum-FTS),
Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieses Leitfadens mitgewirkt haben, sei gedankt.

Dieses Dokument liegt der technischen Redaktion des VDI zur Erstellung eines VDI-Statusreports vor.
Mit der Veröffentlichung des VDI-Statusreports wird dieses Dokument zurückgezogen.

INHALT

1	Einleitung	3
1.1	Rechtlicher Hinweis	3
1.2	Einordnung in die Regelwelt	3
1.3	Begriffswelt	5
1.4	Zielsetzung und Zielgruppe	6
1.5	Inhaltliche Zusammenfassung	6
2	Begriffsbestimmungen	7
2.1	Fahrerloses Transportsystem	7
2.2	Fahrerloses Fahrzeug	7
3	Elektrische Energiekonzepte für FTS	8
3.1	Blei-Gel	8
3.2	AGM	9
3.3	Blei Säure	10
3.4	Lithium-Ionen-Batteriesysteme	11
3.4.1	Mischsystem-Kathoden	11
3.4.2	Eisenphosphat-Kathoden	12
3.5	Boost Caps / Hochleistungskondensatoren / Powercaps / Ultrakondensatoren	14
3.6	Hybride Speichersysteme (Hochleistungskondensatoren + Batterie)	15
3.7	Induktive Energieübertragung	16
3.8	Alternative Techniken	17
3.8.1	Verbrennungsmotor	17
3.8.2	Brennstoffzelle	17
4	Betriebsarten im FTS	18
4.1	Manueller Batteriewechsel (Kapazitive Entladung)	18
4.2	Automatischer Batteriewechsel (Kapazitive Entladung)	18
4.3	Automatisches Zwischenladen und Vollladen zum Schichtende (Kapazitiver Betrieb mit Zwischenladung)	18
4.4	Automatische Zwischenladung (Taktbetrieb)	19
5	Verfahren für die Energiezufuhr	21
5.1	Aufladen im FTF, manuelles Kontaktieren	21
5.2	Ladekontakte, fest installiert	21
5.3	Ladekontakte, ausfahrbar	21
5.4	Batterieladen mittels induktiver Energieübertragung	21
5.5	Manueller Batteriewechsel	22
5.6	Automatische Batteriewechselstation (BWS)	22
5.7	Kontinuierliche und hybride induktive Energieversorgung	22

1 Einleitung

1.1 Rechtlicher Hinweis

Haftungsausschluss: Die in dieser Informationsschrift enthaltenen Angaben, Abbildungen, Hinweise und Empfehlungen wurden nach bestem Wissen erstellt und sorgfältig recherchiert. Dennoch kann eine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität nicht übernommen werden. Soweit gesetzlich zulässig, ist jede Gewährleistung und Haftung ausgeschlossen.

Hinweis: Zur besseren Lesbarkeit wird im nachfolgenden Text auf gendergerechte Formulierungen/Schreibweisen verzichtet. Bei allen Bezeichnungen wie Betreiber, Projektleiter, Lieferant, Planer etc. wird das generische Maskulinum unabhängig vom tatsächlichen Geschlecht der Bezeichneten verwendet.

1.2 Einordnung in die Regelwelt

VDI-Richtlinien zum Themenkomplex FTS beschäftigen sich auf der einen Seite mit der FTS-Technik und auf der anderen Seite mit der FTS-Planung. Dem Thema FTS-Technik dient die VDI 2510 als übergeordnete, zusammenfassende Richtlinie. Für spezielle Themen wurden weiterführende Blätter zur VDI 2510 erstellt. Die VDI 2710 ist die übergeordnete Richtlinie zum Themenbereich Planung.

VDI 2510 Thema: FTS-Technik	VDI 2710 Thema: FTS-Planung
Fahrerlose Transportsysteme	Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen
<p>Alles zur Technik des FTS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugtechnik, insbesondere Navigation, Steuerung, Sicherheit und Energie • FTS-Leitsteuerung • Datenübertragung • Infrastruktur und periphere Einrichtungen <p>ergänzt durch separate Blätter spezieller Themen</p>	<p>Alles zur FTS-Planung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Systemfindung • System-Ausplanung • Beschaffung • Betriebsplanung • Änderungsplanung <p>ergänzt durch separate Blätter spezieller Themen</p>

Abbildung 1 - Schwerpunkte der Richtlinienarbeit des VDI-Fachausschusses Fahrerlose Transportsysteme (FTS)

Die zur VDI 2510 „Technik von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)“ zugeordneten Richtlinien sind:

- VDI 2510 Blatt 1
„Infrastruktur und periphere Einrichtungen für Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“
- VDI 2510 Blatt 2
„Fahrerlose Transportsysteme (FTS) – Sicherheit von FTS“
- VDI 2510 (Blatt 3)
„Fahrerlose Transportsysteme (FTS) – Schnittstellen zu Infrastruktur und peripheren Einrichtungen“
- VDI 2510 (Blatt 4)
„Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“; „Energieversorgung und Ladetechnik“

Die zur VDI 2710 „Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)“ zugeordneten Richtlinien sind:

- VDI 2710 Blatt 1
„Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) – Entscheidungskriterien für die Auswahl eines Fördersystems“
- VDI 2710 Blatt 2
„FTS-Checkliste – Planungshilfe für Betreiber und Hersteller von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)“
- VDI 2710 (Blatt 3) „Einsatzgebiete der Simulation für Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“, die hier vorliegende Richtlinie
- VDI 2710 (Blatt 4)
„Analyse der Wirtschaftlichkeit Fahrerloser Transportsysteme (FTS)“
- VDI 2710 (Blatt 5)
„Abnahmeregeln für Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“
- VDI 2710 (Blatt 6)
„Einführung und Betrieb eines fahrerlosen Transportsystems (FTS)“

Der Leitfaden soll als Ergänzung zu VDI 2510 Blatt 4 „Fahrerlose Transportsysteme - Energieversorgung und Ladetechnik“ verstanden und ergänzend angewandt werden.

Er wurde im Fachausschuss 309 Fahrerlose Transportsysteme des VDI erarbeitet, um Herstellern und Betreibern von fahrerlosen Transportsystemen einen Überblick und eine Entscheidungshilfe bei der Planung und dem Betrieb von Anlagen zu geben. Besondere Berücksichtigung erfuhren dabei die neuen Technologien bezüglich Speichersystemen und der Energieübertragung.

1.3 Begriffswelt

Der Begriff „Fahrerloses Transportsystem“ (FTS, engl. AGV System) wird seit mehr als sechzig Jahren verwendet und beschreibt ein Logistiksystem, beispielsweise eine klassische Intra-logistik-Anwendung (Taxibetrieb), Montagelinien für Serienprodukte (Fließlinien- oder Taktbetrieb) oder eine Aufgabenstellung im Lager, bei der Materialtransporte mittels einer Flotte automatischer Flurförderzeuge erledigt werden. So ein FTS versteht sich als Organisationsmittel und Garant für einen zuverlässigen, sicheren Materialtransport mit definierter Leistung, Verfügbarkeit und Qualität. Die Peripherie und alle parallelen Prozesse der Produktionslogistik sind sorgfältig aufeinander abgestimmt.

Ein typischer Anwendungsbereich ist eine durchgeplante, i.d.R. komplexe Produktionslogistik in Unternehmen, in denen mittels Serien- / Massenfertigung produziert sowie hohe Leistung und Effizienz in Lager und Kommissionierung gefordert wird. Typische Beispiele sind: Logistikzentren, Automobilfertigung, Automobilzulieferbetriebe, Serienfertiger der weißen und braunen Ware, Lebensmittelindustrie, Warenströme (Essen, Müll, Apotheke, Magazin) in Krankenhäusern (abseits der Bettenstationen).

Die Fahrzeuge, die in solchen Systemen zum Einsatz kommen, werden üblicherweise „Fahrerlose Transportfahrzeuge“ (FTF, engl. AGV für Automated Guided Vehicle) genannt und können sich technologisch hinsichtlich ihrer Funktionalitäten (mechanisch, mechatronisch, elektrisch), aber auch hinsichtlich ihrer „Intelligenz“ (Sensorik, Steuerungsfunktionen, Autonomie) sehr unterscheiden.

Seit einigen Jahren gibt es neben diesem klassischen FTS, das im Rahmen eines Systemgeschäfts beschafft und als Projekt realisiert wird, auch Bestrebungen, den Fokus auf das Fahrzeug zu legen (Produktgeschäft). Diese fahrerlosen Fahrzeuge werden häufig nicht als FTF, sondern als Mobiler Roboter (MR), Autonomer Mobiler Roboter (AMR), Mobiler Manipulator, Industrial Mobile Robot (IMR) oder schlicht „Robot“ bezeichnet. Daneben gibt es zahlreiche weitere Bezeichnungen, die häufig auch Produktnamen einzelner Hersteller sind. Meist wird die Disziplin als „Mobile Robotik“ bezeichnet, der dann die Technologien zugeordnet werden. Technologien sind beispielsweise:

- Fahrerlose Transportsysteme (FTS) mit den Fahrzeugen FTF / AGV / AMR
- Mobile Manipulatoren, Cobots
- Mobile Industrieroboter
- Schreitroboter
- Humanoide
- Drohnen, die meist ausgeschlossen werden, weil sie nicht flurgebunden arbeiten

Ausgenommen sind außerdem meist Geräte, die als Verbraucherprodukte gemäß ProdSG auf dem Markt bereitgestellt werden.

1.4 Zielsetzung und Zielgruppe

Dieser Leitfaden richtet sich an Hersteller und Betreiber von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) mit mobilen Robotern (MR), fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und autonomen mobilen Robotern (AMR).

Er soll einen Überblick über die möglichen Batterie- und Ladesysteme verschaffen, stellt aber keine Auswahlhilfe für Energieversorgungskonzepte dar.

1.5 Inhaltliche Zusammenfassung

Die Energieversorgung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) ist von vielen Einflussfaktoren abgänglich, welche sich nicht direkt auf das Fahrzeug selbst beziehen. Hierzu gehören unter anderem die Einsatzzeit, die mögliche Ladezeit, verschiedene Schichtmodelle, die Verfügbarkeit von Personal für eventuelle Batteriewechsel, die Verfügbarkeit von Platz für eventuelle Batterieladestationen und vieles mehr.

Basierend auf den Vorgaben für das Fahrzeug und den Anforderungen aus dem Projekt kann durch den Lieferanten das Ladekonzept erstellt werden sowie das passende Batteriesystem, die zugehörige Ladetechnik und die Kontaktierung ausgewählt werden.

Zudem können auch wirtschaftliche Kriterien die Auswahl beeinflussen. Höhere Erstbeschaffungskosten können bei langer Gebrauchsdauer dennoch wirtschaftlicher sein als preiswerte Systeme mit hohem Betreuungsaufwand oder kurzer Lebenserwartung.

2 Begriffsbestimmungen

2.1 Fahrerloses Transportsystem

Fahrerlose Transportsysteme sind flurgebundene Systeme, die innerbetrieblich innerhalb und/oder außerhalb von Gebäuden eingesetzt werden. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem oder mehreren automatisch gesteuerten, berührungslos geführten Fahrzeugen mit eigenem Fahrantrieb und bei Bedarf aus

- einer Leitsteuerung,
- Einrichtungen zur Standortbestimmung und Lageerfassung,
- Einrichtungen zur Datenübertragung sowie
- Infrastruktur und peripheren Einrichtungen.

Die wesentliche Aufgabe eines Fahrerlosen Transportsystems ist der automatisierte Materialtransport. Im weiteren Sinne zählen zu FTS auch solche Systeme, die für Dienstleistungsaufgaben wie z.B. Handhabung, Überwachung, Reinigung, mobile Auskunft und Führung - auch in öffentlich zugänglichen Bereichen - eingesetzt werden.

2.2 Fahrerloses Fahrzeug

Am Markt existieren viele unterschiedliche Bezeichnungen für die fahrerlosen Fahrzeuge, wie z. B.

- fahrerloses Flurförderzeug,
- (autonomer) mobiler Roboter,
- fahrerloser Routenzug.

Ein derartiges Fahrzeug ist im Sinne dieses Leitfadens ein angetriebenes und flurgebundenes Fahrzeug, konstruiert, um in einem FTS-Lasten automatisiert zu transportieren. Die Sicherheit des Betriebs hängt dabei nicht von einem Fahrer/Bediener/Steuerer ab.

Ein fahrerloses Fahrzeug besteht aus einer mobilen Plattform und Einrichtungen zur Lastaufnahme.

Die mobile Plattform umfasst alle Komponenten, die die Fortbewegung ermöglichen, z.B.:

- Rahmen
- Antrieb
- Energieversorgung
- Spurführung
- Fahrzeugsteuerung

3 Elektrische Energiekonzepte für FTS

Im Folgenden werden die üblichen Energiekonzepte verglichen. Es werden die wesentlichen Punkte zu der Einsatzart und den Einsatzbedingungen sowie die Vor- und Nachteile und relativen Kosten genannt.

3.1 Blei-Gel

Bleisäurebatterien, bei welchen der Elektrolyt in einem Gel festgelegt ist. Wasserstoffbrückenbindungen (schwache Bindungskräfte) bewirken eine Gelierung des Elektrolyten.

Einsatzart:

Für Batteriewechsel, als auch für automatische Ladung im FTF geeignet.

Einsatzbedingungen:

Entladung von -20 – 45° C

Ladung von 0 – 40° C

Vorteile:

Wartungsfrei, für automatische Ladung einsetzbar; mittlere Anschaffungskosten, hohe Marktverbreitung.

Nachteile:

Hohes Gewicht pro Wh, Strombelastbarkeit beim Entladen und Laden etwas geringer als bei AGM.

Lebensdauer:

Mittlere Lebensdauer, i. d. R. 450 bis 750 (pos. Gitterplatten) und bis 1200 (pos. Röhrenplatten) Vollzyklen (80% Entladetiefe), entsprechend etwa 2 bis 4 Jahre.

Kosten:

+++

3.2 AGM

Absorbent Glass Mat (AGM) ist eine weitere Bauform des Bleiakкумуляtors, Bei dieser ist der Elektrolyt in einem Vlies aus Glasfaser gebunden. AGM-Akkumulatoren weisen bei gleicher Kapazität ein besseres Hochstromverhalten als Blei-Gel-Akkumulatoren auf und lassen sich schneller mit stärkerem Strom als Gel-Batterien aufladen.

Einsatzart:

Für Batteriewechsel als auch für automatische Ladung im FTF geeignet.

Einsatzbedingungen:

Entladung von -20 – 45° C

Ladung von 0 – 40° C

Vorteile:

Wartungsfrei, lageunabhängiger Einbau möglich, für automatische Ladung einsetzbar, günstiger Anschaffungspreis, hohe Marktverbreitung.

Nachteile:

Hohes Gewicht pro AH, bei Einsatz für automatische Ladung i. d. R. geringe Lebensdauer.

Lebensdauer:

Mittlere Lebensdauer bei Batteriewechsel, i. d. R. (300 - 400) Vollzyklen (80% Entladetiefe), entsprechend etwa 1 bis 1,5 Jahre.

Kosten:

++

3.3 Blei Säure

Bleibatterien mit flüssigem Elektrolyt mit positiven Gitter- oder Röhrenplatten. Pos. Gitterplattenbatterien bis 300 Ah und darüber zumeist pos. Röhrenplattenbatterien.

Einsatzart:

Mittlere und größere FTS; für automatische Ladung im FTF geeignet.

Einsatzbedingungen:

Entladung von -20 – 55° C

Ladung von 0 – 50° C

Vorteile:

Sehr robust mit hohen Zyklenzahlen (Röhrenplatten) bei niedrigen Anschaffungskosten.

Nachteile:

Hohes Gewicht pro kWh und wartungsintensiv

Lebensdauer:

Mittlere Lebensdauer, i. d. R. 300 (Gitterplatten) bis 1500 (Röhrenplatten) Vollzyklen (80% Entladetiefe), entsprechend etwa 1 bis 5 Jahre.

Kosten:

+

Nickel-Cadmium- und Nickel-Hydridsysteme

Sind heute weitestgehend durch Lithium-Ionen-Batteriesysteme ersetzt; es existieren fast nur noch Altanlagen.

3.4 Lithium-Ionen-Batteriesysteme

Batterien mit Zellen, in denen Lithium-Ionen zwischen Kathode und Anode durch einen Elektrolyten hin und her transferiert und jeweils im Material der Kathode und Anode eingelagert werden. Die heute gebräuchlichen Systeme unterscheiden sich nach der Kombination von Kathodenmaterial und Anodenmaterial. Daher ist der abgedeckte Nennspannungsbereich je Zelle sehr weit gestreckt, von ca. 1,8 V bis 3,8 V.

3.4.1 Mischsystem-Kathoden

Hierbei handelt es sich zumeist um Gemische der Elemente Nickel, Kobalt und Mangan, welche dann häufig als NMC bzw. NCM genannt werden. In der Kombination mit einer kohlenstoffbasierten Anode haben diese Systeme Nennspannungen von 3,6 bis 3,8 V und mit titanatbasierter Anode von 2,2, bis 2,3 V.

Kohlenstoffbasierte Anode

Einsatzart:

Grundsätzlich für alle Größen von FTF ohne Gegengewichtsanforderungen geeignet.

Einsatzbedingungen:

Entladung von -10 – 50° C

Ladung von 0 – 40° C

Vorteile:

Hohe Zyklenlebensdauer gepaart mit höchster Energie- und Leistungsdichte; Zwischenladungen beeinflussen die Lebensdauer nur unwesentlich.

Nachteile:

Höhere Einstiegsinvestition gegenüber anderen Batteriesystemen.

Lebensdauer:

Bis zu mehreren tausend Vollzyklen (100% Entladetiefe).

Je nach System können bis zu 5 bis 8 Jahre Lebensdauer erreicht werden.

Kosten:

++++

Titanatbasierte Anode

Einsatzart:

Grundsätzlich für alle Größen von FTF ohne Gegengewichtsanforderungen geeignet.

Einsatzbedingungen:

Entladung von -28 – 60° C

Ladung von -28 – 50° C (Ausnahmen nur von 0 – 45° C)

Vorteile:

Höchste Zyklenlebensdauer gepaart mit hoher Energie- und Leistungsdichte; Zwischenladungen beeinflussen die Lebensdauer nur unwesentlich.

Nachteile:

Höchste Einstiegsinvestition gegenüber anderen Batteriesysteme.

Lebensdauer:

Bis zu vielen tausend Vollzyklen (100% Entladetiefe).

Je nach System können bis zu 10 Jahre Lebensdauer erreicht werden.

Kosten:

+++++

3.4.2 Eisenphosphat-Kathoden

Hier ist die Kathode mit Eisenphosphat realisiert. Die Systeme werden häufig als LFP bezeichnet. In der Kombination mit einer kohlenstoffbasierten Anode hat das System eine Nennspannung von 3,2 V und mit titanatbasierter Anode von 1,8 bis 1,9 V.

Kohlenstoffbasierte Anode

Einsatzart:

Grundsätzlich für alle Größen von FTF ohne Gegengewichtsanforderungen geeignet.

Einsatzbedingungen:

Entladung von -20 – 60° C

Ladung von -10 – 50° C

Vorteile:

Hohe Zyklenlebensdauer gepaart mit akzeptabler Energie- und Leistungsdichte; Zwischenladungen beeinflussen die Lebensdauer nur unwesentlich.

Nachteile:

Höhere Einstiegsinvestition gegenüber anderen Batteriesysteme.

Lebensdauer:

Bis zu mehreren tausend Vollzyklen (100% Entladetiefe).

Je nach System können bis zu 5 bis 8 Jahre Lebensdauer erreicht werden.

Kosten:

++++

Titanatbasierte Anode**Einsatzart:**

Grundsätzlich für alle Größen von FTF ohne Gegengewichtsanforderungen geeignet.

Einsatzbedingungen:

Entladung von -28 – 60° C

Ladung von -28 – 50° C (Ausnahmen nur von 0° – 45°C)

Vorteile:

Höchste Zyklenlebensdauer gepaart mit mäßiger Energie- und Leistungsdichte; Zwischenladungen beeinflussen die Lebensdauer nur unwesentlich.

Nachteile:

Höchste Einstiegsinvestition gegenüber anderen Batteriesysteme.

Lebensdauer:

Bis zu vielen tausend Vollzyklen (100% Entladetiefe).

Je nach System können bis zu 10 Jahre Lebensdauer erreicht werden.

Kosten:

+++++

3.5 Boost Caps / Hochleistungskondensatoren / Powercaps / Ultrakondensatoren

Diese Hochleistungskondensatoren sind elektrochemische Energiespeicher (anders als Kondensatoren, die elektrische Energiespeicher sind) und zeichnen sich durch Kapazitäten bis zu mehreren tausend Farad pro Zelle aus. Sie können sehr viel schneller ge- und entladen werden als Akkumulatoren. Sie überstehen außerdem sehr viel mehr Lade-/Entladezyklen und eignen sich deshalb sowohl als Ersatz als auch Ergänzung von Akkumulatoren.

Einsatzart:

Automatische Schnellaufladung eines FTF, Rekuperation, Überbrückung von Strecken ohne Stromversorgung, generell Anwendungen mit hohen Leistungen bei gleichzeitig hohen Strömen in Lade- und Entladerichtung (in „Batteriesprache“: mehrere 100C)

Einsatzbedingungen:

0 – 40° C

Vorteile:

Hohe zyklische und kalendarische Lebensdauer sowie hohe Leistungsdichte und spezifische Leistung; Hochstromlademöglichkeit (ermöglicht sehr kurze Zwischenladezeiten)

Nachteile:

Deutlich höhere Kosten bei großen Kapazitäten, hohe Preise pro kWh, sehr niedrige Preise pro kW. Einsatz meist nur mit zusätzlichen Pufferbatterien möglich. Geringe Energiedichte und spezifische Energie. Nur für das Überbrücken von verhältnismäßig kurzen Strecken geeignet.

Lebensdauer:

Hoch, bis zu 10 Jahre im Mehrschichtbetrieb.

Kosten:

++++

3.6 Hybride Speichersysteme (Hochleistungskondensatoren + Batterie)

Geschickte Kombination aus Hochleistungskondensatoren mit günstigeren Batteriesystemen, um die Nachteile beider Systeme gegenseitig auszugleichen. Auslegung des normalen Prozesses mit Kondensatoren (häufig in 24/7 Montageanwendungen). Bedarfsspitzen werden über die ansonsten volle Batterie realisiert, sodass die Lebensdauer der Batterien deutlich erhöht wird, wobei der Nachteil der geringen Energiedichte der Kondensatoren durch die Batterie ausgeglichen wird.

Einsatzart:

Automatische Schnellaufladung eines FTF, taktzeitparalleles Laden

Einsatzbedingungen:

0 – 50°

Vorteile:

Hohe Lebensdauer, Hochstromlademöglichkeit (sehr kurze Zwischenladezeiten und somit hohe Verfügbarkeit des FTF); hohe Sicherheit sowie redundantes Energiesystem mit sehr hoher Verfügbarkeit; geringe Komplexität der Komponenten; geringe Kosten in Vergleich zu Batteriesystemen mit ähnlicher Leistungsdichte.

Nachteile:

Weniger geeignet für Systeme mit langer Standzeit. Schnellladefähigkeit begrenzt auf Kondensatoren, danach vergleichsweise langsame Nachladung. In der Regel nur in Zusammenhang mit 24V Motorsystemen oder Inverter möglich.

Lebensdauer:

>10 Jahre im Mehrschichtbetrieb.

Kosten:

+++

3.7 Induktive Energieübertragung

Der Einsatz der induktiven (berührungslosen) Energieübertragung erlaubt den Aufbau von Fahrzeugen ohne Onboard-Energiespeicher. Anstelle dessen wird entlang des Fahrwegs des FTF im Boden ein Leiterpaar verlegt, das mit einem hochfrequenten Wechselstrom gespeist wird. Am Fahrzeug angebrachte „Stromabnehmer“ koppeln nach dem Induktionsprinzip berührungslos elektrische Energie aus dem Feld aus, das diese Leiter umgibt.

Einsatzart:

Klassische reine Versorgung durch die Energieübertragung oder in Kombination mit Energiespeicher. Somit wird eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Energieversorgung möglich.

Einsatzbedingungen:

0 – 40° C

Vorteile:

Geringe Instandhaltungskosten, hohe Anlagenverfügbarkeit, kein Zeitaufwand für Batterieladung bzw. Batteriewechsel

Nachteile:

Bei kontinuierlicher Energieversorgung unflexibel im Hinblick auf Fahrkursänderungen (Bodenarbeiten erforderlich); nur begrenzter Einsatzbereich (z. B. nicht möglich bei Stahlbetonboden); hohe Verluste bei langen Fahrstrecken.

Kosten:

+++++

3.8 Alternative Techniken

3.8.1 Verbrennungsmotor

Sehr selten. Wird nur im Außenbereich für große Fahrzeuge verwendet.

Entwicklung der Antriebskonzepte direkt vom Fahrzeughersteller. Technologie wird hier nicht weiter betrachtet.

3.8.2 Brennstoffzelle

Im Gegensatz zu den USA, in denen Brennstoffzellen recht weit verbreitet sind, sind sie in Europa derzeit noch selten, d. h., es gibt kaum bekannte kommerzielle Projekte. Diese Technologie wird hier nicht weiter betrachtet.

Tabelle 1: Gegenüberstellung und Vergleich der Energiespeicher-Technologien und ihrer jeweiligen spezifischen Eigenschaften.

Kathode	Anode	Nennspannung	Wartungsfrei	Zyklen	Maximaler Entladestrom	Maximaler Ladestrom	Volumetrische Energiedichte	Gravimetrische Energiedichte	Investitionskosten
PbO ₂ / PbSO ₄ Flüssigelektrolyt	Pb/PbSO ₄	2 V	Nein	300 – 1500	1,1 – 1,3 C	0,4 C	80 – 105 Wh/l	35 – 45 Wh/kg	+
PbO ₂ /PbSO ₄ AGM	Pb/PbSO ₄	2 V	Ja	300 - 400	1,5 – 1,8 C	0,4 C	100 – 120 Wh/l	30 – 40 Wh/kg	++
PbO ₂ /PbSO ₄ Gel	Pb/PbSO ₄	2 V	Ja	450 - 1200	1,2 – 1,5 C	0,3 C	80 – 100 Wh/l	27,5 – 37,5 Wh/kg	+++
(NiMnCo) ₂ O ₂ Mischsysteme	Graphit**	3,6 V – 3,8 V	Ja	bis 1500	2-5 C	3-8 C	150 – 160 Wh/L	145 – 150 Wh/kg	++++
(NiMnCo) ₂ O ₂ Mischsysteme	Ti ₅ O ₁₂	2,2 – 2,3 V	Ja	> 5000	5 C	5 -20 C	65 Wh/l	60 – 65 Wh/kg	+++++
FePO ₄	Graphit**	3,2 V	Ja	Bis 2000	3-5 C	5 – 8 C	170 – 200 Wh/l	135 – 140 Wh/kg	++++
FePO ₄	Ti ₅ O ₁₂	1,8 – 1,9 V	Ja	> 5000	5 C	5 – 20 C	70 Wh/ l	60 Wh/kg	+++++
Hoch-leistungs-kondensatoren	Keine	2,7 V	Ja	>	120 – 3600 C	120 – 3600 C	4,2 Wh/l	3,6 Wh/kg	++++

4 Betriebsarten im FTS

Im Folgenden werden die gängigen Ladestrategien beschrieben.

4.1 Manueller Batteriewechsel (Kapazitive Entladung)

Die kapazitive Entladung setzt voraus, dass zu Beginn der Arbeitsschicht die Batterie vollgeladen ist. Die Batteriekapazität ist so dimensioniert, dass die Betriebskapazität, d. h. max. 80% der Nennkapazität bei Blei- und 100% bei Lithium-Ionen-Systemen der Nennkapazität, über die gesamte Arbeitsschicht zur Verfügung steht. Beim Entladevorgang dürfen dabei die Grenzwerte nicht überschritten werden (Strom, Temperaturen etc.). Nach Entnahme der Betriebskapazität muss für eine Vollladung der Batterie genügend Zeit zur Verfügung stehen. In der Regel wird die gleiche Zeit für das Laden wie für das Entladen bzw. Fahren benötigt (i. d. R. nicht kürzer als 7,5h). Das Nachladen findet üblicherweise bei Bleibatterien und einfachen Li-Ionen-Systemen entweder direkt im Fahrzeug (meist 1-Schicht Betrieb) oder in einem extra Laderaum (meist Mehrschichtbetrieb) statt.

Merkmale:

- + 1- bis 3-Schicht-Betrieb möglich
- + günstige Anschaffungskosten
- + einfaches System
- relativ viel Aufwand für das Wechseln und Warten im Mehrschichtbetrieb

4.2 Automatischer Batteriewechsel (Kapazitive Entladung)

Die kapazitive Entladung setzt voraus, dass zu Beginn der Arbeitsschicht die Batterie vollgeladen ist. Die Batteriekapazität ist i. d. R. so dimensioniert, dass die Betriebskapazität, d. h. max. 80% der Nennkapazität bei Blei- und 100% bei Lithium-Ionen-Systemen der Nennkapazität über die gesamte Arbeitsschicht zur Verfügung steht. Beim Entladevorgang dürfen dabei die Grenzwerte nicht überschritten werden (Strom, Temperaturen etc.). Nach Entnahme der Betriebskapazität muss für eine Vollladung der Batterie genügend Zeit zur Verfügung stehen.

Hinweis. Speziell konzipiert, konstruiert und gebaut

4.3 Automatisches Zwischenladen und Vollladen zum Schichtende (Kapazitiver Betrieb mit Zwischenladung)

Auch bei der kapazitiven Entladung mit Zwischenladungen (auch „Opportunity Charging“ genannt) geht man davon aus, dass zu Beginn der Arbeitsschicht die Batterie vollgeladen ist. Die Batteriekapazität ist so dimensioniert, dass die Betriebskapazität, d. h. max. 80 % der Nennkapazität bei Blei- und 100 % bei Lithium-Ionen-Systemen der Nennkapazität einschließlich der Summe der Kapazitätserhöhungen durch Nachladungen über die gesamte Arbeitsschicht ausreichend ist.

Durch die Nachladungen erhöht sich der Energieumsatz der Batterien und es stellen sich höhere Batterietemperaturen ein, die die Brauchbarkeitsdauer der Batterie verkürzen. Nach Entnahme der

Betriebskapazität muss für eine Vollauffüllung der Batterie genügend Zeit zur Verfügung stehen. Diese Betriebsart findet man nur im 1- und 2-Schichtbetrieb.

Merkmale:

- + günstige Anschaffungskosten
- verminderte Lebensdauer der Bleibatterien gegenüber dem „normalen“ (kapazitiven) Betrieb.

4.4 Automatische Zwischenladung (Taktbetrieb)

Für den Taktbetrieb ist die Betriebskapazität einer Batterie so ausgelegt, dass die Energiereserven bis zum nächsten Ladezeitpunkt ausreichen. Die Ladung der Batterie findet in oder neben der Anlage, meist sogar während eines Arbeitsprozesses statt. Am Ladestandort muss genügend Zeit zur Verfügung stehen, die entnommene Energie wieder nachzuladen. Die Batterien verbleiben den gesamten Arbeitstag im Fahrzeug und werden nur durch Zwischenladungen geladen. Ein tägliches Nachladen oder Wechseln der Batterie entfällt. Für die Dimensionierung ist meist vorrangig der tägliche Energiedurchsatz maßgeblich. Als besonders geeignet für diesen Betrieb gelten die Hochleistungskondensatoren, Lithium Batterien und auch NiCd Batterien.

Merkmale:

- + Betrieb über 24h / Tag und 7 Tage pro Woche möglich und üblich
- + Hochstromlademöglichkeit (sehr kurze Zwischenladezeiten)
- + günstige "life cycle cost" durch geringen Wartungsbedarf
- + deutlich geringerer Personalbedarf für Wartung der Batterien
- Hochleistungskondensatoren, NiCd / Lithium gegenüber Blei-Batterien teurer bei der Erstinvestition

Tabellen 2 bis 4: Empfehlungen von Energiesystemen für verschiedene Betriebsarten.

Betriebsart	Manueller Batteriewechsel	Automatischer Batteriewechsel
1-Schichtbetrieb	X	X
2-Schichtbetrieb	X	X
3-Schichtbetrieb	X	X
I. d. R. genutzter Batterietyp	Blei- und einfache Lithiumsysteme	Blei- und einfache Lithiumsysteme
wenige Fahrzeuge	+	-
Viele Fahrzeuge	-	+

Betriebsart	Automatische Zwischenladung (Taktbetrieb)	
1-Schichtbetrieb	X	
2-Schichtbetrieb	X	
3-Schichtbetrieb	X	
I. d. R. genutzter Batterietyp	Lithium	Hochleistungs-kondensatoren
Wenige Fahrzeuge	+	+
Viele Fahrzeuge	+	+

Betriebsart	Automatisches Zwischenladen und Völlladung am Schichtende	
1-Schichtbetrieb	X	
2-Schichtbetrieb	X	
3-Schichtbetrieb	-	
I. d. R. genutzter Batterietyp	Blei	Lithium
Wenige Fahrzeuge	+	+
Viele Fahrzeuge	-	+

5 Verfahren für die Energiezufuhr

Grundsätzlich kann man unterscheiden zwischen Ladeverfahren, bei denen die Batterie während des Ladevorgangs im Fahrzeug verbleibt, und solchen, bei denen die Batterie außerhalb des Fahrzeugs geladen wird. Außerdem kann zwischen manueller und automatischer Kontaktierung unterschieden werden.

5.1 Aufladen im FTF, manuelles Kontaktieren

Ist das Energiesystem ausreichend ausgelegt, um den Tagesbedarf der Transportaufgaben abzudecken, und ist genügend Zeit vorhanden, um eine Nachladung der Energie zu gewährleisten, lässt sich über das manuelle Anstecken sehr kostengünstig Energie zuführen. Entweder wird das stationäre Ladegerät mit der Batterie oder das On-Board-Ladegerät mit dem Netz verbunden.

5.2 Ladepunkte, fest installiert

Konstruktiv lassen sich für einen automatisierten Ladevorgang seitlich, oben oder unten fest installierte Ladepunkte (z. B. Ladepunkt am Fahrzeug / Ladepunkt am Boden oder umgekehrt) platzsparend und kostengünstig integrieren. Sobald das Ladegerät eine Gegenspannung vom Energiesystem des Fahrzeugs erkennt, wird der Ladevorgang gestartet. Im Ruhezustand sollten alle Kontakte aus Sicherheitsgründen spannungsfrei sein. Hierbei ist die Positionierung der Ladepunkte frei wählbar, also am Boden, seitlich oder oben.

5.3 Ladepunkte, ausfahrbar

Bei dieser Art der Verbindung vom Ladegerät zum FTF werden die Ladepunkte, wie in 3.2 beschrieben, an die Gegenstelle von unten, oben oder von der Seite angedrückt, bevor der Ladevorgang gestartet wird. Das Ausfahren der beweglichen Ladepunkte kann je nach Ausführungsart sowohl vom FTF als auch von der Ladestation erfolgen.

5.4 Batterieladen mittels induktiver Energieübertragung

Im Gegensatz zu den berührenden Verfahren in 3.2 und 3.3 kommen hier induktive, berührungslose Ladepunkte und -kontakte zum Einsatz. Fahrzeugseitig muss ein Laderegler vorgesehen werden, der zur ausgewählten Batteriesystem passen muss. Die Distanz zwischen der induktiven Ladepunkte und dem Pickup (mobiler induktiver Stromabnehmer) liegt in einem Bereich zwischen 10 – 50 mm. Je höher der Energiebedarf des Fahrzeugs ist, desto größer fallen die Ladepunkte und Stromabnehmer aus. Für kleinere Fahrzeuge mit geringerer Leistung gibt es bereits zahlreiche Anbieter für die kontaktlose Batterieladung.

Vorteile: Unterschiedliche Fahrzeugtypen können an derselben Ladestation geladen werden. Außerdem treten geringe Verschmutzungen, kein Abrieb und kein Verschleiß auf. Auch ist die erforderliche Positioniergenauigkeit geringer und es kann i. d. R. aus jeder beliebigen Richtung auf die Ladeplatte gefahren werden.

Nachteil: Höherer technischer Aufwand und höhere Kosten.

Um den Energiebedarf abzudecken, wird eine entladene Batterie dem FTF manuell entnommen und durch eine aufgeladene Batterie ersetzt. Diese Vorgehensweise wird angewandt, wenn nicht genügend Zeit vorhanden ist, um eine Nachladung des Tagesenergiebedarfs am FTF abzudecken. In der Regel ist dies eine sehr kostengünstige Art, bedingt aber Mitarbeiter, die diesen Wechsel zuverlässig durchführen.

5.5 Manueller Batteriewechsel

Um den Energiebedarf abzudecken, wird eine entladene Batterie dem FTF manuell entnommen und durch eine aufgeladene Batterie ersetzt. Diese Vorgehensweise wird angewandt, wenn nicht genügend Zeit vorhanden ist, um eine Nachladung des Tagesenergiebedarfs am FTF abzudecken. In der Regel ist dies eine sehr kostengünstige Art, bedingt aber Mitarbeiter, die diesen Wechsel zuverlässig durchführen.

5.6 Automatische Batteriewechselstation (BWS)

Bei diesem System erfolgt der Austausch der Batterie automatisch durch ein entsprechendes Handlingsgerät. Die BWS entnimmt die entladene Batterie aus dem FTF und tauscht diese gegen eine aufgeladene aus. Das Aufladen, einlagern und wieder Bereitstellen der Batterien erfolgt im BWS automatisiert. Diese Technik kommt zum Einsatz, wenn es keine Möglichkeit gibt, den Energiebedarf in Ruhezeiten des FTS zu decken und keine Mitarbeiter für den manuellen Batteriewechsel zur Verfügung stehen. Die Kosten eines BWS sind i. d. R. relativ hoch.

5.7 Kontinuierliche und hybride induktive Energieversorgung

Bei der kontaktlosen oder berührungslosen Energieversorgung wird die Energie dauerhaft von einem Einspeisekonverter über ein Linienleiterpaar kontaktlos an das FTF übertragen. Ein Ladesystem besteht üblicherweise aus einer stationären Energieeinspeisung (Einspeisesteller), einem Schaltmodul mit Linienleiter (Übertragungsstrecke im Boden), einem Übertragerkopf (Pick-Up) an der Unterseite des Fahrzeugs und einem Anpasssteller im Fahrzeug. Der Anpasssteller liefert die Zwischenkreisspannung im Fahrzeug und stellt somit die Energieversorgung sicher.

Fahrzeuge, die ausschließlich induktiv mit Energie versorgt werden, benötigen auf allen Fahrwegen den im Boden eingebauten Linienleiter. Das sind üblicherweise zwei parallel zueinander verlegte Kabel mit einem Aderquerschnitt von 25 bis zu 40 mm². Der Linienleiter wird in Schlitze im Boden eingelegt und vergossen.

Der Aufwand zur Verlegung der Linienleiter ist, speziell im Bereich von Kreuzungen und Abzweigungen, nicht unerheblich. Um komplexe Bodeninstallationen zu vermeiden, kommt oft ein hybrides

Energieversorgungssystem zum Einsatz. Hierbei werden Pufferbatterien verwendet, die es ermöglichen, kurze Strecken ohne induktive Energieversorgung zurück zu legen. Diese Variante bietet zudem den Vorteil, Spitzenleistungen des FTF (z. B. Anheben eines Hubtisches) aus der Batterie abzurufen, ohne das induktive Energieversorgungssystem zu überlasten.

Die Induktive Energieversorgung kommt meist bei Montageanlagen mit einfachem Fahrkurs und vielen Fahrzeugen zum Einsatz, da diese Anlagen häufig für lange Zeiten ohne Veränderungen/Umbauten am Fahrkurs betrieben werden. Dadurch amortisieren sich die hohen Installationskosten für die Bodenanlage meist schnell.

Allgemein ist anzumerken, dass der Installationsaufwand hoch und im Vorfeld eine genaue Planung erforderlich ist. Änderungen an solchen Systemen sind mit hohem Aufwand verbunden.