

Drahtlos Akkus aufladen

Gerhard Wiesspeiner
BTI - Technologie und Innovation
info@bticcs.com www.bticcs.com

Kurzfassung:

Minimieren von Aufwand und Kosten bei gleichzeitigem maximieren von Effizienz, Zuverlässigkeit und Akku-Lebensdauer sind grundlegende Forderungen an jede Akku-Ladeschaltung.

Für bestimmte Geräte (z. B. autonome, potentialfreie, wasserdichte oder Ex-geschützte Handteile) sind Steckverbindungen zum Ladegerät von großem Nachteil oder sogar unmöglich (z.B. Implantate).

Dieser Beitrag beschreibt an Hand von konkreten Beispielen verschiedene Design-Kriterien zur Kombination von induktiver Energieübertragung und intelligenter Ladetechnik, damit die Akkus auch kontakt- bzw. drahtlos, über eine lange Lebensdauer, schnell und zuverlässig, aufgeladen werden können.

Einführung:

Kontaktlose Ladetechnik kann die Handhabung vieler elektrischer Geräte entscheidend verbessern. Insbesondere betroffen sind Geräte die täglich mehrmals verwendet werden und immer wieder aufgeladen werden, wie zBsp. Schnurlos- bzw. Mobiltelefone, elektr. Zahnbürsten, Rasierapparate, Spielzeuge und ähnliche Geräte im Haushalt. Daneben gibt es andere Anwendungen, bei denen weniger die lästige und umständliche Handhabung von Steckverbindern im Vordergrund steht, sondern die Sicherheit des Betreibers. Ein Beispiel sind Elektrofahrzeuge, die bei Wind und Wetter nachgeladen werden sollen, ein anderes sind Geräte in explosiver Umgebung (entzündliche Gase) bei denen Funken (Stecker) unzulässig sind. Ein weiteres Anwendungsfeld ergibt sich für Geräte, bei denen es keine Steckverbinder oder Durchführungskontakte geben kann. In diese Gruppe fallen einerseits medizinische Implantate (Herzschrittmacher, Biotelemetrie) und andererseits alle vollkommen gekapselten, hermetisch dichten Geräte z.Bsp. für Unterwasseranwendungen.

Drahtlose Ladetechnik:

Unter "Drahtlos Akkus aufladen" versteht man also eine Ladetechnik, bei der die Energie zum Laden des Akkus ohne Kabel oder Steckverbindungen (drahtlos) und ohne elektrische Kontakte- (kontaktlos) zwischen der Ladestation und dem Anwendungsteil übertragen wird.

Drahtlos kann diese Energie prinzipiell auf folgende Arten bereitgestellt werden:

Energieform	Wirk-Komponente	Wandler	Leistung	Reichweite	Wirkungsgrad
Optisch	Strahlung	LED-Solarzelle	mW	m	<1%
Mechanisch	Bewegung	Piezowandler	W	µm	80%
Kapazitiv	Spannung	Elektrode	µW	µm	60%
Induktiv	Strom	Spule	kW	cm	98%
Elektromagn. Feld	Welle	Antenne	µW	km	<1%

Aus theoretischen und praktischen Überlegungen kommt in der Praxis meist eine induktive Übertragung im Nahfeld zweier Spulen zum Einsatz (Transformatorische Kopplung).

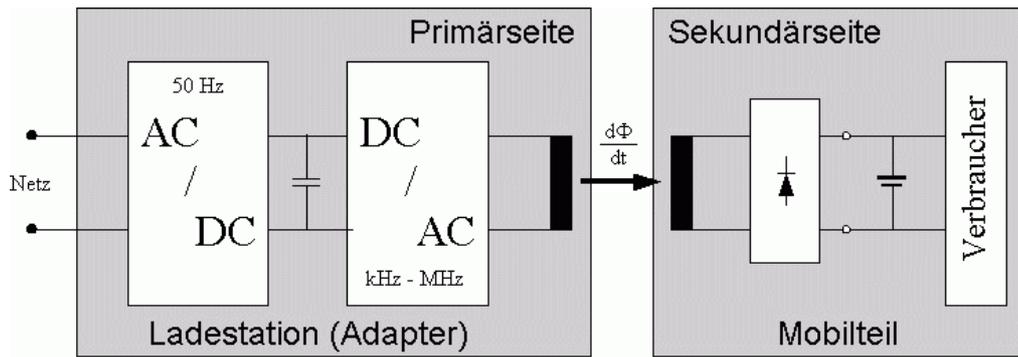


Abbildung 1: Blockschaltbild eines induktiven Ladegerätes

Der Unterschied zu einem konventionellen Trafo besteht nun darin, daß Primär- und Sekundärseite mechanisch voneinander getrennt sind. Zum Laden wird der Mobilteil einfach in den Adapter, d.h. in das Feld der Ladestation, gelegt. Die Energie wird zwischen den beiden (Gehäuse-) Teilen induktiv, ohne direkten elektrischen Kontakt, als magnetisches Wechselfeld übertragen. Der Abstand beträgt dabei meist wenige Millimeter. Nach der Aufladung verbleibt die Primärseite des Trafos (Erregerwicklung) stationär in der Ladestation. Die Sekundärseite ist im Mobilteil und wird mit diesem bei Gebrauch aus dem Ladeadapter entnommen.

Dadurch ergeben sich mehrere

Vorteile:

- ✓ Lästiges An/Abstecken entfällt
- ✓ Keine Kontaktbelastung/Verschleiß
- ✓ Berührungssicher und potentialfrei
- ✓ Hermetische Kapselung
- ✓ Fehlersicher

Nachteil: (bei Redesign)

- x Lade- und Mobilteil bilden eine konstruktive Einheit

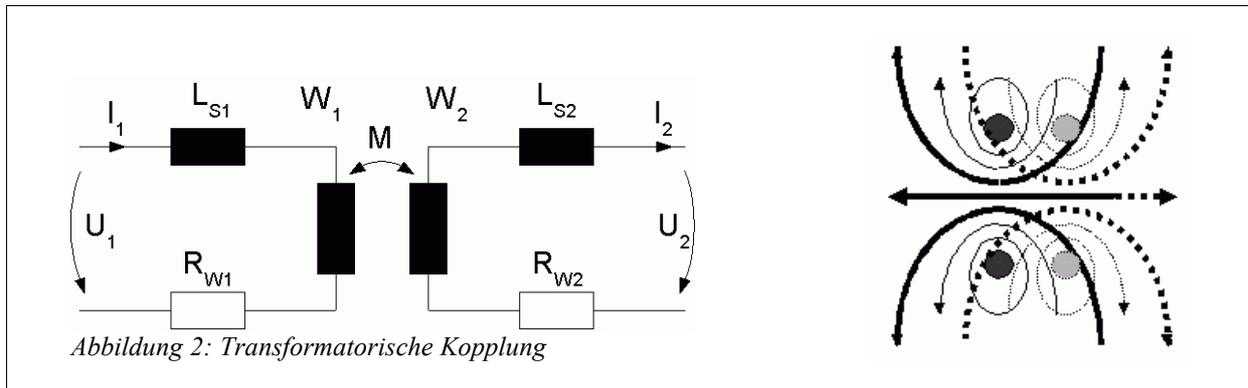
Beispiele für drahtlose Akku Ladetechnik:

Anwendung	Leistung	Vorzug
elektr. Zahnbürste	mW	einfache Handhabung
autonome Roboter	200W	keine Stecker, autom. andocken
aktive Chipkarten	mW	Kontaktlos, Lesen auf Distanz
Implantate	W	Keine Stecker möglich
med Handgeräte	W	einfache Handhabung
Langzeit-Telemetrie	mW	Bewegungsfreiheit, kabellos
Elektrofahrzeuge (EV)	kW	Handhabung, Sicherheit
Hörgeräte	mW	Handhabung bzw. Implantat
Monitor Einschubtechnik	W	Potentialfrei, steril
Explosionsschutzgeräte	W	Kontaktlos, hermetisch dicht

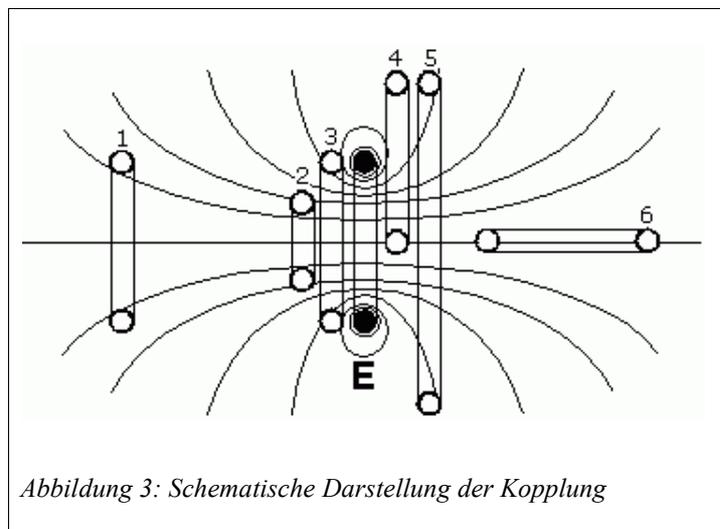
Während man beim Design von konventionellen Ladegeräten die beiden Funktionsblöcke Ladekontroller/Energieregler zu berücksichtigen hat kommt hier die 3. Komponente, die (drahtlose) Übertragungsstrecke (Energie und Steuersignale) dazu.

Energieübertragungsstrecke (Transformatorische Kopplung):

Da die Energieübertragungsstrecke wesentlichen Einfluß auf das Design des Gesamtsystems darstellt, sollte hier auf grundlegende Eigenschaften der magnetischen Induktion hingewiesen werden.



Das Prinzip der Transformatorischen Kopplung ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Übertrager besteht aus zwei Spulen, deren Fluß miteinander verkettet ist. Die Einzelinduktivität teilt sich auf in den einen Teil, der mit dem Gegenfeld der anderen Spule verkettet ist (Koppel- oder Gegeninduktivität M, fette Feldlinien) und dem verbleibenden Rest (Streuinduktivität Ls, Feldlinien durch nur eine Spule) auf. Da in der Streuinduktivität nur Spannungsabfall und Blindleistung entsteht, gilt es den Anteil der Streuinduktivität (Verluste, Störspannungen) gegenüber der Koppelinduktivität möglichst gering zu halten.



In der Praxis bedeutet das, die Spulen so anzuordnen, daß die Kopplung möglichst groß wird, bzw. daß möglichst viele Feldlinien beide Spulen durchfluten.

Bild 3 zeigt schematisch, welcher Anteil der Feldlinien einer Erregerspule (E) auf die unterschiedlich angeordneten Sekundärspulen (1..6) wirkt und wie groß dabei das jeweilige Streufeld ist.

Ideal sind zwei möglichst deckungsgleiche Spulen mit geringstem Abstand.

In vielen Fällen, wie zBsp. bei Implantaten ergibt sich mechanisch bedingt allerdings ein Mindestabstand der Spulen und auch Deckungsgleichheit kann nicht immer durch Formschluß der beiden Gehäuse (Beispiel el. Zahnbürste) garantiert werden.

Wie wirkt sich nun die Anordnung der Spulen auf die Energieübertragung aus?

Die allgemeine Formel zur Berechnung der Kopplung (Gegeninduktivität) zweier Stromkreise wird durch die "Neumannsche Gleichung" beschrieben.

$$M = \frac{\mu}{4\pi} \oint_{I_1} \oint_{I_2} \frac{dI_1 dI_2}{r_{12}} \quad \text{Neumannsche Gleichung}$$

Die Neumannsche Gleichung bildet das Ringintegral über alle stromdurchflossenen Leiterschleifen (I). In der Praxis jedoch, ist man allerdings meist auf empirische Ermittlungsverfahren angewiesen, weil die Berechnung des Integrals über alle Stromschleifen (Feldlinien) wegen der gegenseitigen Beeinflussung und Rückwirkung äußerst schwierig und nur für spezielle Anordnungen (z.B. konzentrische axiale Lage) näherungsweise möglich ist.

Beispiel: Implantate

Als Ausgangswert für eigene Designs können folgende Kurven (Abbildung 6 und 5) dienen, die bei Untersuchungen zur Energieversorgung von Implantaten (Bild 4) ermittelt wurden.

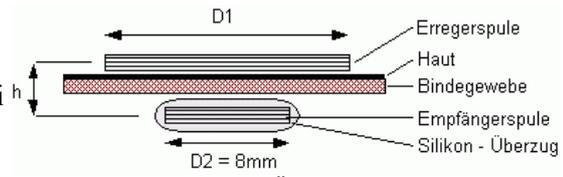


Abbildung 4: Induktive Übertragung bei Implantaten

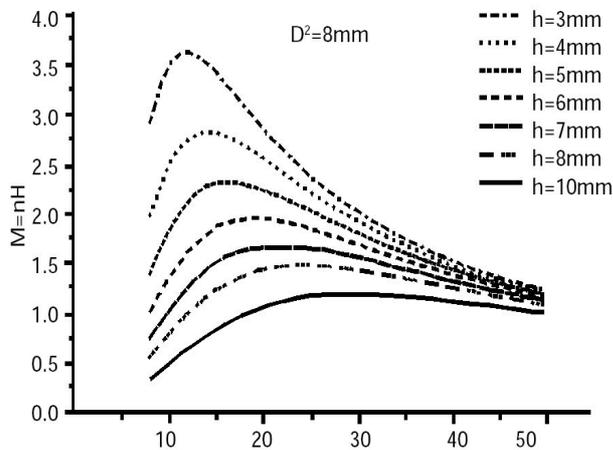


Abbildung 5: Kopplung in Abhängigkeit von D_1

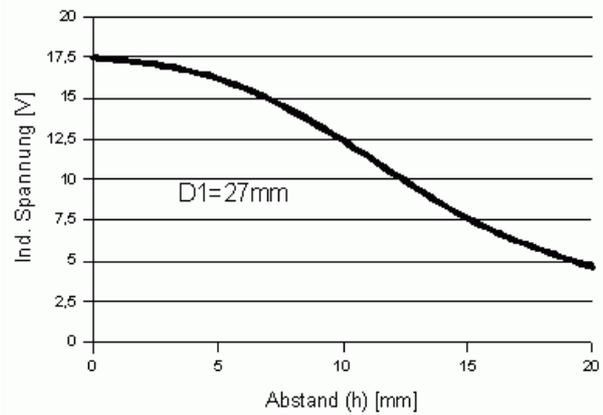


Abbildung 6: Induktion in Abhängigkeit vom Abstand

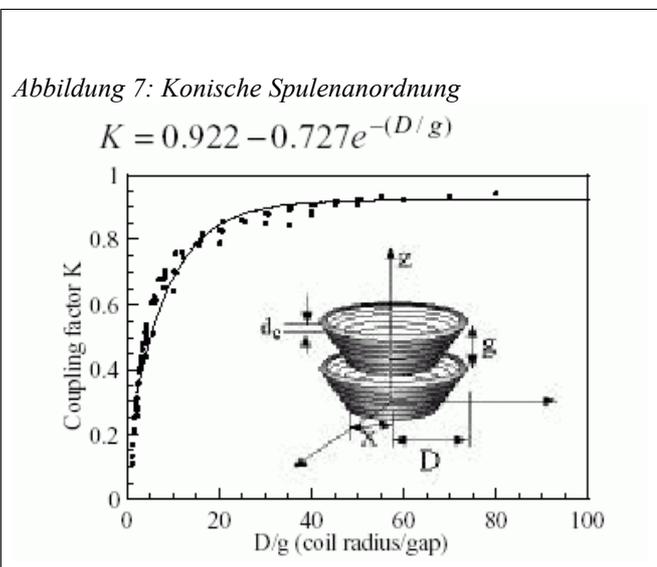
Der Durchmesser der implantierten Spule ($L_1=0.8\text{mH}$) beträgt $D_1=8\text{mm}$. Auf der x-Achse ist der Durchmesser der Erregerspule ($L_2=1\text{mH}$, $D_2=8-50\text{mm}$) aufgetragen. Der Parameter h entspricht der Distanz zwischen den Spulen. Oszillatorfrequenz $f_0=12\text{MHz}$.

Optimiert wurde diese auf eine Erregerspule D_1 mit $D_1=27\text{mm}$. Abhängig vom Abstand (Abbildung 5), beträgt dabei die induzierte Spannung an einem $1\text{k}\Omega$ Lastwiderstand ca. 15V rms (15mA). Seitliche Positionierungsfehler verändern die induzierte Spannung nur geringfügig ($<10\%$), solange die Fläche D_2 innerhalb von D_1 liegt.

Beispiel: Roboter

Eine interessante Übertrager-Spulen-Anordnung wird bei der Aufladung von Unterwasser-Robotern verwendet. Dabei sind die beiden eisenlosen Spulen konisch gewickelt und positionieren sich daher formschlüssig automatisch und konzentrisch übereinander (Abbildung 7).

Bei einer Übertragungsleistung von 200W wird ab einem Verhältnis von Spulenradius (D) zum Spulenabstand (g) ein Koppelfaktor von 90% erreicht.



Beispiel: Smart Card

In den meisten Fällen allerdings, insbesondere wegen der geringen Flußdichte des magnetischen Feldes in Luft, sind eisenlose Übertrager-Spulen nur bei geringer Leistung und relativ großem Spulendurchmesser günstig (vgl: RFID-Transponder)

Smart Card Daten: $f=13\text{MHz}$, $L=10\text{Wdg}$, $A=10\text{mm}^2$, $P=10\text{mW/d}=10\text{mm}$, $P=100\mu\text{W/d}=100\text{mm}$

Transformatorische Kopplung mit Eisenkernen:

Beispiel: Zahnbürste

Klassisches Beispiel für diese Anordnung ist die elektrische Zahnbürste. Der Eisenkern befindet sich in der Ladestation ("Docking Station") und das Handgerät (Mobilteil) mit der integrierten Sekundärspule wird formschlüssig aufgesteckt.

Die hohe Permeabilität eines Eisen ($\mu=5..500..$) oder Ferritkernes ($\mu=10..10000$) konzentriert die Feldlinien in den Kern und leitet den Fluß an die gewünschten Austritts-Pole. Dadurch wird der magnetische Widerstand der Luftspule und das Streufeld um den μ -fachen geringeren magn. Widerstand im Kern verringert, und es ist eine wesentlich bessere Kopplung möglich.

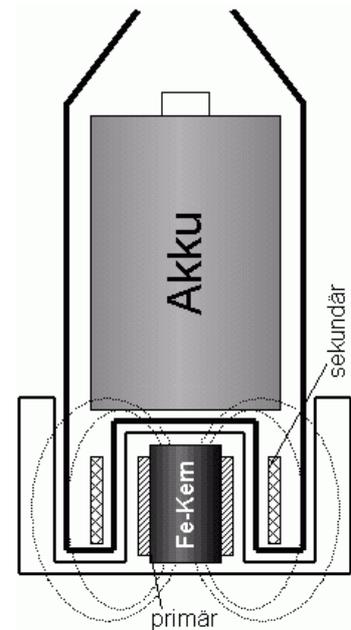


Abbildung 8: Elektrische Zahnbürste, Schnittbild

Allerdings muß man auch bei Spulenkernen (EI, EE, UU..) beachten, daß der Abstand zwischen der primären und sekundären Kernhälfte klein bleibt, damit der magnetische Fluß beide Kerne durchflutet und sich nicht über die Magnet-Pole des Erregerkernes schließt.

Beispiel: Mobiltelefon

Als Ausgangswert für eigenes Design kann die Untersuchung an Kernformen für ein kontaktloses Ladegerät für Mobiltelefone dienen.

Im Bild ist der Koppelfaktor (k) für U und E Kerne als Funktion der Gesamtlänge (w) zum Luftspalt (g) aufgetragen. (Kernmaße: Breite $b=7\text{mm}$, Höhe $h=7\text{mm}$, Einschnitt $t=5\text{mm}$) Bei einem Verhältnis von 11 (zBsp. $33\text{mm}/3\text{mm}$) ergibt sich ein Koppelfaktor von ca 55%. In diesem Beispiel hätte der Sekundär-Kern ein Gewicht von 4g, ausreichend für ca. 3 Watt Ladeleistung.

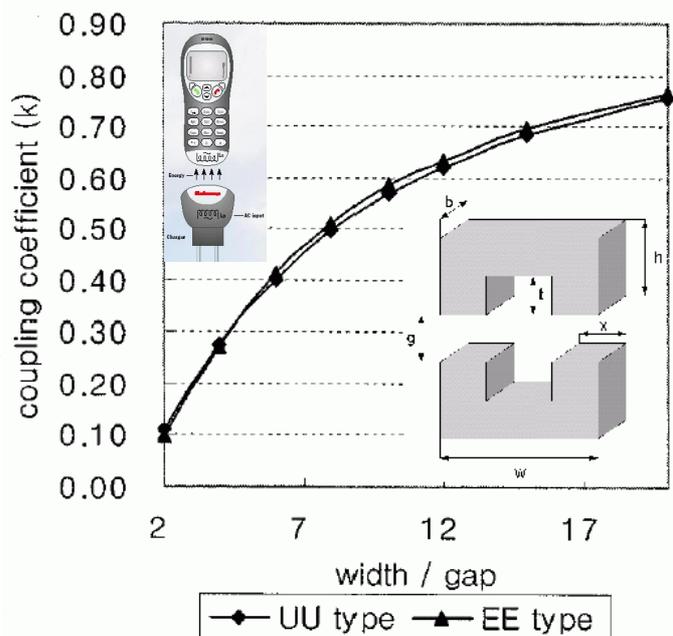


Abbildung 9: Koppelfaktor für U und E-Kerne

Beispiel: Elektrofahrzeuge

Wesentlich höhere Leistungen werden bei der "Induktiven Tankstelle" für Elektrofahrzeuge übertragen. Über das "Inductive Paddle" schließt sich der magn. Kreis, sodaß bei einer Frequenz von 80-300kHz folgende Übertragungs-Leistungen definiert sind:

- Level 1 Charging = 1.44 kVA ,
- Level 2 Charging = 6.66-7.68 kVA
- Level 3 Charging = 160 kW (DC)



Abbildung 10: EV-Paddle

Ladeschaltungen

Ahnlich wie bei drahtgebundenen Ladegeräten kann man beim kontaktlosen Laden grundsätzlich 3 Arten der Ladekontrolle unterscheiden:

- Ungeregelt
- Off-Board Lader
- On-Board Lader

ad 1 Ungeregelter Lader:

Typisches Beispiel ist auch hier die elektrische Zahnbürste. Über die transformatorische Kopplung wird eine angepaßte Sekundärspannung erzeugt, wodurch sich der Ladestrom des Akkus reduziert.

Es ist ein Kompromiß zwischen Ladezeit und Überladung zu treffen.

Die Schaltung ist billig, arbeitet jedoch langsam, ungenau, mit begrenzter Leistung und kann trotzdem eine Überladung und Reduktion der Akku-Lebensdauer nicht verhindern.

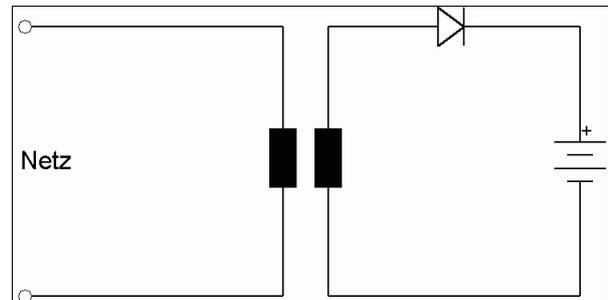


Abbildung 11: Ungeregelter Lader

ad 2 Off-Board Lader:

Der Ladecontroller befindet sich in der Ladestation. Hier wird die Energie in ein hochfrequentes Magnet-Feld umgewandelt und induktiv übertragen. Im Mobilteil erfolgt eine Gleichrichtung und Einspeisung in den Akku. Zur Begrenzung des Ladestromes und der Ladeschlusspannung müssen diese Werte gemessen und an den Leistungssteller (PWM) bzw. Ladecontroller (kontaktlos) übertragen werden. Dabei handelt es sich meist nur um eine Regelgröße zur Begrenzung von Maximal-Spannung und -Strom.

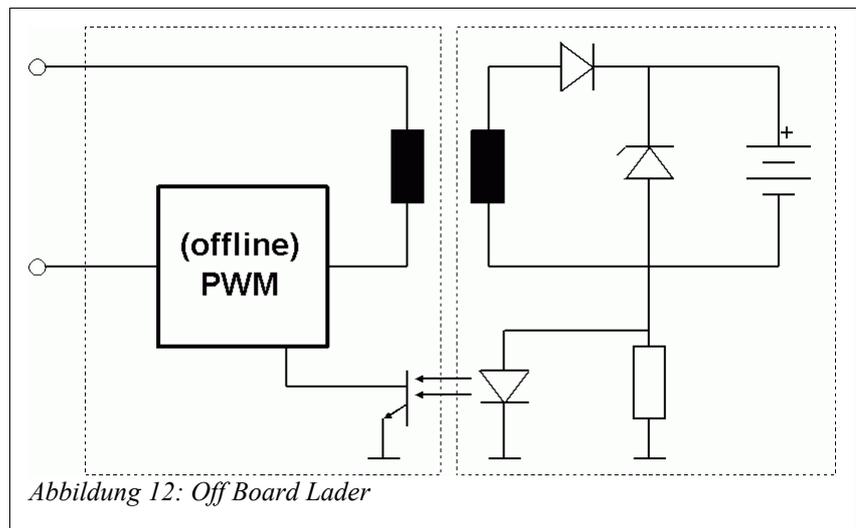


Abbildung 12: Off Board Lader

ad 3 On-Board Lader

Hier ist der Lade-Regler beim Akku im Mobilteil untergebracht.

Primärseitig wird nur ein HF-Feld zur Verfügung gestellt. Der Ladestrom-regler muß die Variationen auf der Energie-Übertragungsstrecke durch unterschiedliche Kopplung ausgleichen.

Man erreicht zwar eine bessere Überwachung der Batterie, kann aber die übertragene Leistung nicht voll ausschöpfen.

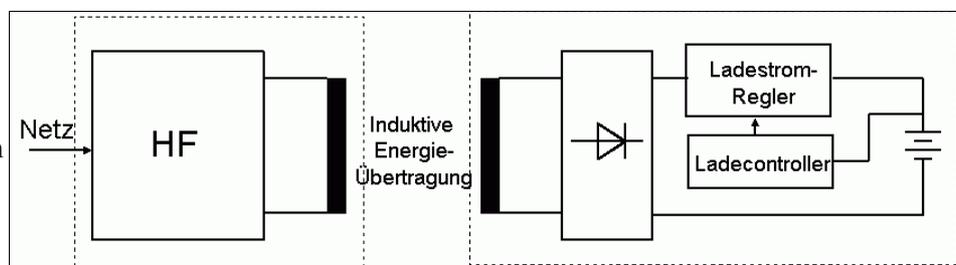


Abbildung 13: On Board Lader

Die gezeigten Ladeschaltungen arbeiten entweder unreguliert oder mit Spannungs- und Strombegrenzung. Das genügt für einfache Anwendungen, bei denen es weniger auf Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Akkus ankommt. Konventionelle Ladeverfahren berücksichtigen nicht die limitierte Leistung und variable Impedanz der Übertragungsstrecke (Streuinduktivität, Spannungsabfall, variabler Strom, usw.) .

Intelligente Ladetechnik:

Zu den wichtigsten Eigenschaften eines Ladegerätes zählt die Fähigkeit, möglichst genau zu erkennen, wann der Akku voll geladen ist, und dann rechtzeitig abzuschalten, um damit eine Überladung, verbunden mit Verlust an Kapazität und Lebensdauer, zu vermeiden.

Dies ist besonders in jenen Fällen wichtig, bei denen eine sehr hohe Zahl an Lade/Entladezyklen zu erwarten ist, wie zum Beispiel bei Werkzeugen (Akku-Schrauber, -LötKolben, Handgeräte) oder wenn, wie beispielsweise bei Implantaten, hohe Lebenserwartung verlangt wird, weil keine Möglichkeit besteht den Akku auszutauschen oder ein Tausch mit hohen Servicekosten verbunden ist.

Während einfache Ladeverfahren nur einzelne Parameter überwachen (Spannung, Strom, Temperatur, Zeit), wird bei intelligenten Ladecontrollern eine Vielzahl von Werten berücksichtigt.

Für höchste Qualität und Zuverlässigkeit ist dabei seit vielen Jahren das CCS-Verfahren bekannt.

Durch die Anwendung komplexer Algorithmen (Adaptation, Modellbildung, Musteranalyse) kann von einem CCS-Controller für alle Akkutechnologien aus dem Verlauf der "Inneren Impedanz" der 100% Vollzustand ermittelt werden. Diese Kenngröße entspricht den Ladeprozessen im Inneren des Akkus (Elektroden-Elektrolyt Übergang) und ist von der Zelltype, Chemie, Exemplarstreuung, Alterung, Temperatur und Umgebungseinflüssen weitestgehend unabhängig.

Ein besonderer Vorteil im Hinblick auf drahtlose Energieübertragung ist, daß die CCS-Methode vom Funktionsprinzip her, keine Stromstabilisierung benötigt. Damit können Stromschwankungen von alternativen Energiequellen (Solarzellen) ebenso, wie von induktiven Übertragungsstrecken akzeptiert werden. Dadurch lassen sich Bauteile einsparen und zusätzliche bzw. unnötige Lade-Verluste vermeiden.

Beispiel: Drahtloser CCS-Lader

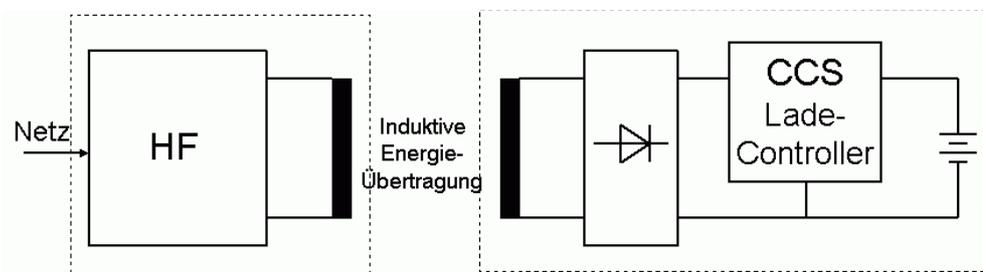


Abbildung 14: Induktives CCS-Ladegerät (Blockschaltbild)

Zur Anwendung in miniaturisierten Geräten wurde ein neuer CCS Ladecontroller (E50128) entwickelt. Abbildung 14 zeigt das Blockschaltbild. An Stelle der Induktiven Energieübertragung könnte auch eine optische Energiezufuhr aus Solarzellen stehen.

Die tatsächliche Realisierung ist in Abbildung 16 und Abbildung 15 dargestellt.

Die komplette Ladeschaltung besteht aus einem Minimum an Bauteilen (Spule, Gleichrichter, Kondensator, Widerstand, CCS-Ladecontroller, LEDs und Akku) und benötigt nicht einmal 8x8mm Fläche. Die Aufbauhöhe beträgt weniger als 1mm.

Die Schaltung kann bereits mit einer einzigen NiMH Knopfzelle arbeiten. (Anmerkung: Grundsätzlich ist das CCS-Verfahren automatisch für alle Akkutechnologien und Konfigurationen geeignet).

Ein großer Vorteil der Schaltung ist, daß der ohnehin durch Streuverluste verringerte, von der induktiven Übertragungsstrecke zur Verfügung stehende Strom nicht abgeregelt werden muß, sondern zur Gänze zum Laden des Akkus verwendet wird. Dabei bleiben auch große Stromschwankungen ohne schädliche Auswirkung auf die Ladequalität. Der Stromverbrauch des CCS-Controllers selbst ist sehr gering und liegt im Lade-Betrieb bei ca. 0,5mA (Standby ca. 1µA).

Der Ladeschluß wird nach der CCS-Methode bestimmt. Zusätzlich überwacht der neue CCS-Controller auch die Temperatur und den Energiefluß. Eine weitere Besonderheit ist integrierte Flash-Speicher-Bereich, in dem nicht nur Akku- bzw. kundenspezifische Informationen, sondern auch Histogramme über die Ladezyklen im täglichen Einsatz abgelegt werden können.

Das Beispiel "Drahtloser CCS-Lader" zeigt, daß es schon bei einem Minimum an Schaltungsaufwand möglich ist, Akkus mit höchster Zuverlässigkeit drahtlos aufzuladen.

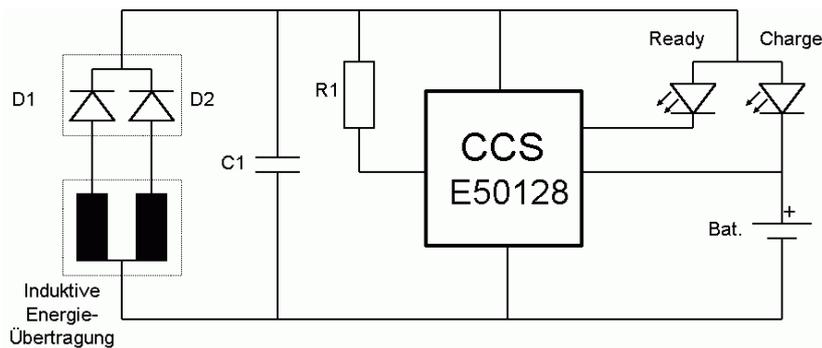


Abbildung 16: Komplette Induktive CCS Ladeschaltung

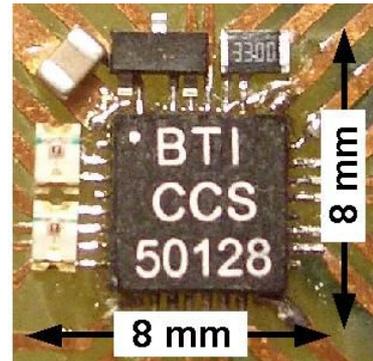


Abbildung 15: Komplette CCS Ladeschaltung

Referenzen:

- (1) EV1 Club, ev1-club.powernet/newchg.htm
- (2) Munoz R., Estudio del enlace inductivo transcutaneo en el suministro de energia en dispositivos electronicos implantados, Revista Mexicana de Ingenieria Biomedica, Num. 4, 129-136
- (3) Yuiji Obata, Fundamental Considerations on contactless power transmission for a robot in the sea, www.ieee.or.jp/honbu/back_number/journal/index_back_number/2001_08a04.pdf
- (4) Chang-Gyun Kim, Design of a Contactless Battery Charger for Cellular Phones, IEE Transaction on Industrial Electronics, No.6, 1238-1247
- (5) CCS ein neues Ladeverfahren zum automatischen Laden von Akkus, 2001, <http://www.bticcs.com/> --> Articles and Publications

Autor:

Prof.Dipl.Ing.Dr.tech. Gerhard Wiesspeiner
 BTI- Technologie und Innovation
 Rudolfstraße 14, A-8010 Graz
 Tel. +43/316/326031 Fax +43/316/381808
 info@bticcs.com www.bticcs.com