



*Energy
for life*

Kontaktlose Energieübertragung und Effizienz: Ein Widerspruch?

Von Andreas Hagemeyer

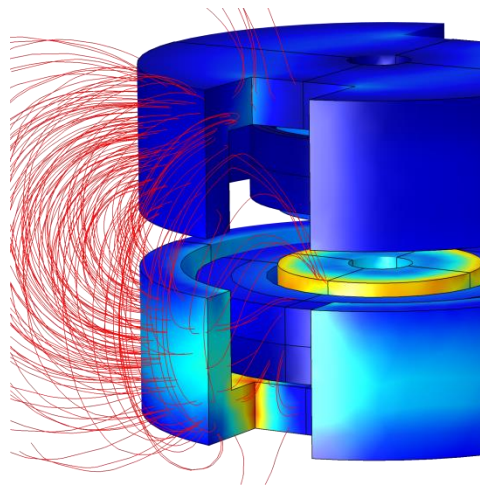


Abbildung: Induktive Energieübertragung

Sei es bei mobilen Verbraucher-Endgeräten wie Smartphones und Tablets oder bei industriellen Anwendungen mit Bedarf an staub-, wasser- oder gasdichten Ladevorgängen: Die kontaktlose Energieübertragung befindet sich eindeutig auf dem Vormarsch. Doch wie lässt sich ein solcher kabelloser Ladevorgang auch effizient gestalten?

M.Sc. Andreas Hagemeyer von FRIWO hat sich dieser Fragestellung gewidmet und stellt ein geeignetes System vor. Der Schlüssel heißt dabei: Kommunikation.

Die kabellose Technik und ihre Vorteile

Von Tag zu Tag finden sich mehr kabellose Ladelösungen am Markt. Bei diesen Lösungen wird anstelle des üblichen kabelgebundenen Netzteils eine Ladestation eingesetzt, bei welcher das Endgerät lediglich aufgelegt wird. Die Übertragung der benötigten Energie zum Laden des Akkus erfolgt über eine elektromagnetische Kopplung, was die Verbindung von Endgerät und Stromquelle mittels herkömmlicher Steckkontakte überflüssig macht. Für den Anwender ist dies in erster Linie einmal sehr bequem in der Handhabung, weshalb sich diese Technik derzeit vor allem bei mobilen Consumer-Geräten wie Smartphones oder Tablets zunehmender Beliebtheit erfreut. Aber diese Technik birgt noch einen weiteren immensen Vorteil: Mittels der elektromagnetischen Kopplung kann die Energieübertragung über kurze Strecken auch durch elektrisch isolierende Materialien hindurch erfolgen. Dies ermöglicht die Entwicklung von Lade- und Endgeräten mit vollständig geschlossenen Gehäusen, was das Eindringen von Staub, Gas oder Wasser verhindert. Dieser Aspekt macht die Anwendung der kabellosen Ladetechnik auch für Geräte mit Einsatz in

rauen Umgebungsbedingungen höchst interessant, beispielsweise bei Elektrowerkzeugen, E-Bikes oder Robotern, die das Saugen, Wischen oder Rasenmähen übernehmen. Die Alterungsprozesse der elektrischen Kontakte sind bei derartigen Geräten durch Korrosion und Verschmutzung beschleunigt, die Produktlebenszeiten lassen sich mit der kabellosen Technik daher deutlich verlängern. Auch in der Industrie können die Vorteile der kontaktlosen Energieübertragung hervorragend genutzt werden, beispielsweise liefert diese Technik die Antwort auf die Problemstellung der sicheren Aufladung von Geräten in explosionsgefährdeten Bereichen.

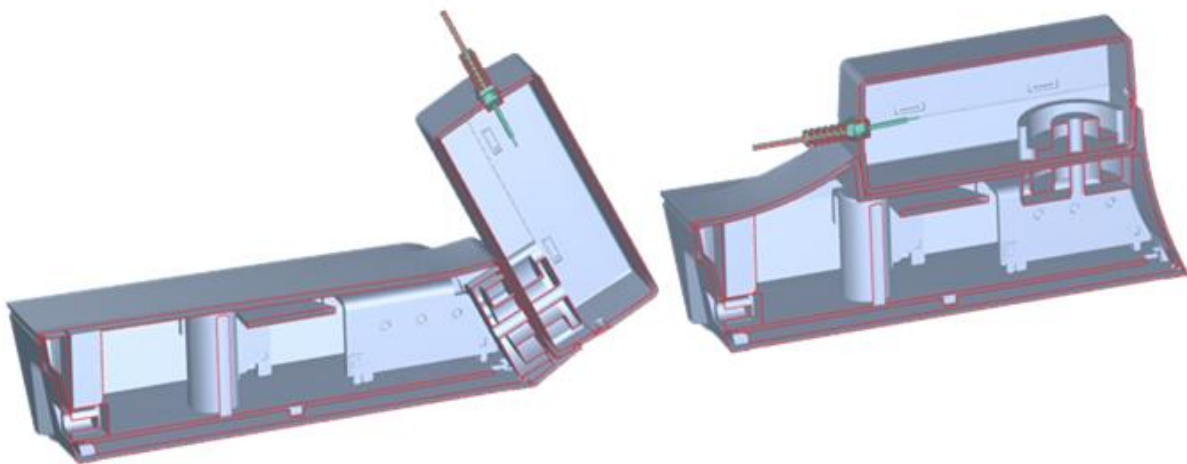


Abbildung: Querschnitt von Ladegerät und Empfänger einer möglichen Applikation

Das Problem: Die Energiebilanz

Allen Vorteilen dieser Übertragungstechnik steht jedoch eine schlechtere Energiebilanz gegenüber. Auf der Übertragungsstrecke zwischen Ladestation und Endgerät geht unweigerlich Energie verloren. Im Bereich der Smartphones und Tablets ist der Energieverbrauch pro Gerät verhältnismäßig gering, sodass der Mehrverbrauch durch kontaktloses Laden auf der Stromrechnung kaum auffällt. Mit steigendem Energiebedarf der Anwendung steigt jedoch auch die auf der Übertragungsstrecke verlorene Energie. Um hier die Vorteile der kontaktlosen Energieübertragung nutzen zu können, ohne dabei große Einbußen bei der Effizienz in Kauf nehmen zu müssen, ist ein entsprechendes technisches Lösungskonzept nötig. FRIWO nutzt ein innovatives Verbundkonzept aus Energie- und Datenübertragung zwischen Ladestation und Endgerät, welches im weiteren Verlauf dieses Artikels näher erläutert wird. Außerdem werden die vielfältigen Möglichkeiten eines solchen Systems geschildert. Zunächst erfolgt aber eine grundsätzliche Beschreibung der kontaktlosen Energieübertragung, da sich hieraus auch die Notwendigkeit der parallelen Datenübertragung ergibt.

Technische Grundlagen der kontaktlosen Energieübertragung

Die gängigste Form, Energie über kurze Strecken kontaktlos zu übertragen, ist die induktive Kopplung. Hierbei wird auf der Sender- und Empfängerseite jeweils eine Spule implementiert. Die Spule auf der Senderseite wird mit einer Wechselspannungsquelle verbunden, so dass sich um die Spule ein alternierendes magnetisches Feld aufbaut. Befindet sich die Spule auf der Empfängerseite in der Nähe der Senderspule, sorgt die Änderung des Magnetfeldes dafür, dass in der Empfängerspule ein Strom induziert wird. Dadurch kann ein elektrischer Verbraucher auf der Empfängerseite mit Energie versorgt werden. Die Übertragungsparameter eines solchen Systems sind zum einen von der Bauform der Spulen abhängig, zum anderen von den Positionen von Sender- und Empfängerspule. Da sich die Position der Spulen zueinander nicht nur von Ladevorgang zu Ladevorgang, sondern auch während eines Ladevorgangs jederzeit ändern kann, ist eine Überwachung der Ausgangsparameter und eine entsprechende Kompensation der Abweichungen unumgänglich. Bei der Übertragung von kleinen Leistungen kann dies über einen Linearregler realisiert werden, welcher die überschüssige Leistung auf Kosten der Energieeffizienz in Wärme umsetzt. Bei größeren Leistungen ist hierfür ein Schaltregler zu empfehlen, da er wesentlich weniger Verluste verursacht. Beide Varianten müssen jedoch auf der Empfängerseite, also in der mobilen Anwendung, installiert werden. Dieser erhöhte Platzbedarf der Ladeelektronik führt unweigerlich entweder zu einer Vergrößerung der Abmessungen der Anwendung oder zu einer Einsparung des entsprechenden Volumens an anderer Stelle – wodurch eventuell sogar die Kapazität des Akkus reduziert wird. In Zeiten höchstkompakter mobiler Geräte mit maximalen Akkulaufzeiten werden beide Alternativen durch den Anwender kaum hingenommen.

Das von FRIWO eingesetzte Konzept umgeht diese Problematik, in dem die Abweichungskompensation der Ausgangspegel innerhalb der Ladestation vorgenommen wird. Die Kompensation findet in dem Teil der Ladestation statt, welcher die anliegende Netzspannung in eine für das induktiv gekoppelte Übertragungssystem angepasste Rechteckspannung umwandelt. Um die Vorteile dieser Vorgehensweise zu erläutern, soll zuerst ein Überblick über die Komponenten der Energieübertragung gegeben werden.

Das Herzstück der Energieübertragung bildet das Spulensystem, welches den Energietransport von der Ladestation zum Energieempfänger ermöglicht. Ein solches Spulensystem kann vereinfacht auch als Transformator angesehen werden. Die eine Hälfte des Transformators, bestehend aus der Primärwicklung sowie einer Transformator kernhälfte aus ferromagnetischem Material, befindet sich in der Ladestation. Die zweite Hälfte, also die Sekundärwicklung und eine weitere Transformator kernhälfte, befindet sich im Energieempfänger. Mit diesem Aufbau kann die Energie über kurze Strecken auch durch die Luft oder durch nicht leitfähige Materialien übertragen werden, was die Energieübertragung durch geschlossene Gehäusewände ermöglicht.

Die Herausforderungen: Magnetfeldausbreitung und Streuinduktivität

Da die Energie über ein magnetisches Feld übertragen wird, lässt sich nicht vermeiden, dass sich dieses auch außerhalb des Übertragungssystems ausbreitet. Die Einhaltung festgelegter Grenzwerte aus den entsprechenden Normen sorgt dafür, dass keine Gefährdung für den Anwender besteht und keine Beeinflussung anderer technischer Geräte zu befürchten ist. Bei kleinen Übertragungssystemen ist die Einhaltung dieser Grenzwerte noch relativ einfach zu bewerkstelligen, mit steigender Leistung wächst aber auch die Problematik. Die Auswirkungen des magnetischen Feldes führen beispielsweise zu einer Erwärmung von elektrisch leitfähigen Materialien im näheren Umfeld des Übertragungssystems. Dies kann gerade bei temperaturempfindlichen Akkuzellen zu Problemen führen. FRIWO verzichtet in seinem Konzept bei den Spulen und Transformator-kernen gezielt auf flache Bauformen. Stattdessen greift man hier auf Typen aus dem Schaltnetzteilbereich zurück. Diese Kerne haben bei gleichem Volumen einen größeren Querschnitt. Dadurch eignen sie sich zwar nicht für das Design sehr flacher Anwendungen, jedoch wirkt sich der größere Querschnitt positiv auf den magnetischen Widerstand des Kernes aus und reduziert somit die elektromagnetische Emission außerhalb des Übertragungssystems.

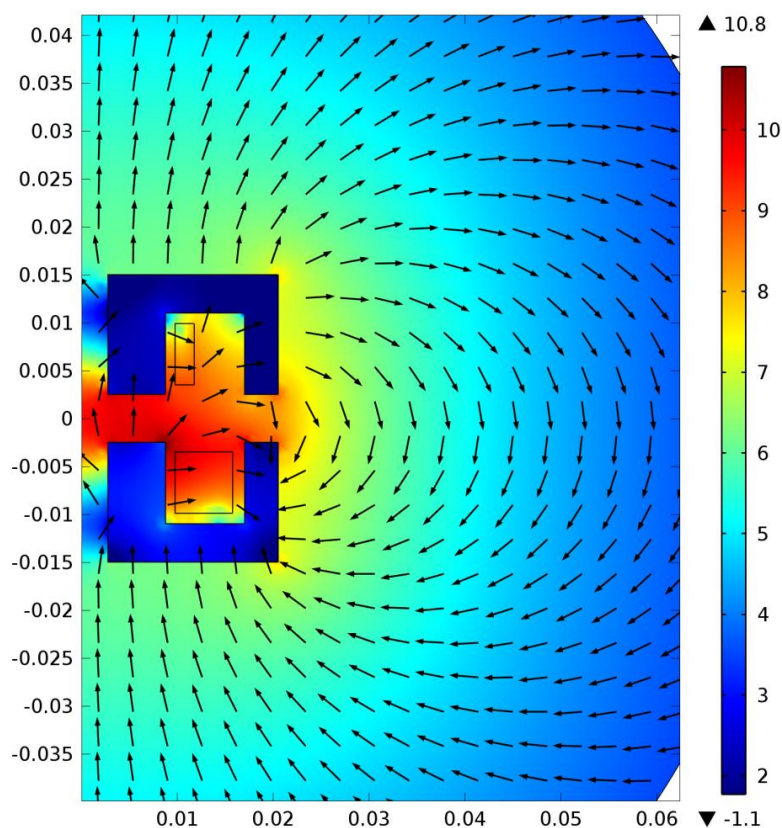


Abbildung: Ferromagnetische Kerne schützen das Umfeld vor elektromagnetischer Strahlung

Der Abstand zwischen den Transformator-kernen führt dazu, dass das Übertragungssystem eine größere Streuinduktivität aufweist. Feldtheoretisch bedeutet dies, dass ein Teil des magnetischen Flusses, welcher in der Primärwicklung aufgebaut wird, nicht durch die Sekundärwicklung fließt und somit nicht zur Übertragung beiträgt. Die Streuinduktivität wird dabei durch die Bauform der Spulen beeinflusst. Ausschlaggebend sind der Radius der Windungen und deren Position sowie Form und Größe des Transformator-kerns. Hier eröffnen sich natürlich Optimierungsmöglichkeiten, jedoch lässt sich die Streuinduktivität in einem solchen Übertragungssystem nicht vollständig kompensieren.

Schaltungskonzept zur kontaktlosen Energieübertragung mit Resonanzwandler

Doch auch mit diesem von Natur aus verlustbehafteten System kann mit dem passenden Schaltungskonzept eine hohe Effizienz des Gesamtsystems erreicht werden. FRIWO nutzt hierfür das Konzept des Resonanzwandlers, ein Schaltungskonzept, welches auch in herkömmlichen Netzteilen und Ladegeräten eingesetzt wird. Die Hauptbestandteile neben dem Übertragungssystem (dem Transformator) bilden dabei eine Schaltung zur Erzeugung einer Rechteckspannung und eine Kapazität. Die Kapazität ist dabei ein Kondensator, welcher zusammen mit dem Transformator einen LC-Schwingkreis bildet. Wird die Frequenz der Rechteckspannung nun nahe der Resonanzfrequenz des Schwingkreises gewählt, kommt es zu einer Erhöhung der an dem Trafo anliegenden Spannung beziehungsweise des durch den Trafo fließenden Stromes. Der Grund hierfür ist die zwischen Resonanzkapazität und Trafo hin und her schwingende Energie. Um diesen Effekt nutzen zu können, muss in dem Trafo zwangsläufig eine Streuinduktivität vorhanden sein. Bei herkömmlichen Netzteilen mit Resonanzwandlern wird diese Induktivität absichtlich durch entsprechende Kernbauformen und Wickeltechniken erzeugt. Mit einem solchen Konzept lässt sich beispielsweise in einem Übertragungssystem mit 150W Leistung eine Effizienz von bis zu 90% erreichen. Die gemessene Effizienz bezieht sich hierbei auf das Gesamtsystem, also von der Steckdose bis zum Empfänger.

Das beschriebene Schaltkonzept eignet sich auch um die Spannungs-Strom-Charakteristik einzustellen, welche besonders für Ladegeräte wichtig ist. Diese Charakteristik sorgt dafür, dass der Akku bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung mit einem konstanten Strom geladen wird. Mit Erreichen der Ladeschlussspannung schaltet das Netzteil auf den Konstant-Spannungs-Betrieb um und reduziert auf diesem Weg den Ladestrom. Dies funktioniert wie folgt: Der Resonanzwandler arbeitet im Konstant-Spannung-Betrieb mit einer fest eingestellten Frequenz. Sobald der maximale Ausgangsstrom erreicht wird, erhöht eine Regelung die Schaltfrequenz, sodass sich diese von der Resonanzfrequenz entfernt. Dies hat zur Folge, dass die Ausgangsspannung sinkt und sich das Netzteil in einem Konstant-Strom-Betrieb befindet.

Bei der Herstellung von klassischen Netzteilen mit Resonanzwandler wird die Ausgangsspannung auf einen festen Wert getrimmt. Der Ausgangsstrom wird indes im Netzteil gemessen und an die Regelung übergeben. Bei der kontaktlosen Energieübertragung sind im Prinzip die gleichen Komponenten vorhanden, nur sind diese auf zwei voneinander getrennte und isolierte Gehäuse aufgeteilt. Durch die Freiheiten einer kontaktlosen Energieübertragung kann sich der schematische Aufbau des Systems wie bereits angemerkt stetig ändern, beispielsweise durch unterschiedliche Platzierungen des Energieempfängers auf der Ladestation. Ebenso sind Wechsel von Ladestationen oder Empfangsteilen denkbar. Infolge der stetigen Änderungen im Ladesystem weichen Ausgangsspannung und/oder -strom unweigerlich von den gewünschten Werten ab. Die Information über die Abweichung ist in dem Energieempfänger zwar zu jeder Zeit vorhanden, um in die Regelung wirksam eingreifen zu können wird diese Information allerdings in der Ladestation benötigt.

Eine Nahfelddatenübertragung lässt Energiesender und -empfänger miteinander kommunizieren

Zur Kompensation der Abweichungen von Ausgangsspannung und -strom setzt FRIWO eine Nahfelddatenübertragung ein, welche den Energiesender über die jeweilige Abweichung im Empfänger informiert. Über diesen Zweck hinaus bietet die Datenübertragung weitere Einsatzmöglichkeiten und Vorteile. Sender und Empfänger können vielfältige Informationen austauschen und sich untereinander abstimmen. So kann beispielsweise der Energieempfänger die Ladestation nach erfolgtem Ladevorgang in einen Energiesparmodus versetzen. Auch kann die Datenübertragung einen sicheren Betrieb gewährleisten: Das Batteriemangement kann bei Fehlerfällen wie Übertemperatur oder einem Defekt einzelner Zellen den Ladevorgang drosseln oder gänzlich abbrechen. Außerdem sind Authentifizierungsmöglichkeiten gegeben, sodass sichergestellt werden kann, dass Ladestation und Energieempfänger zusammen passen.

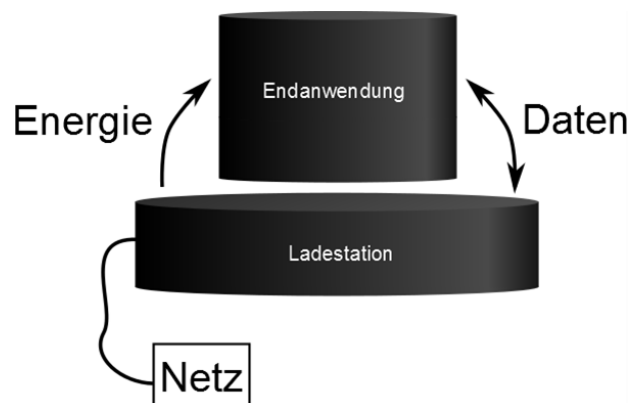


Abbildung: Parallele Datenübertragung in einem kontaktlosen Energieübertragungssystem

Um die Regelung und Überwachung der Ausgangsparameter zu ermöglichen wird eine Datenübertragung benötigt, die möglichst geringe Latenzzeiten aufweist und eine sichere Verbindung zwischen Ladestation und Energieempfänger gewährleistet. Um diesen Umständen gerecht zu werden, setzt FRIWO auf ein Nahfeldübertragungssystem, welches eine Verbindung lediglich über wenige Zentimeter ermöglicht. Mit diesem System ist sichergestellt, dass eine Verbindung nur zwischen der Ladestation und dem tatsächlich aufgelegten Energieempfänger aufgebaut werden kann. Falsche Kopplungen zu benachbarten Übertragungssystemen oder zu freien Empfangsteilen in der Nähe werden ausgeschlossen. Da dementsprechend keine Sender- und Empfängeradressen mit übermittelt werden müssen, kann das Protokoll zum Austausch von Daten reduziert werden. Somit ist die benötigte Rechenleistung gering, was den Einsatz kostengünstiger Mikrocontroller ermöglicht.

Antennenstruktur und Antennengeometrie als Schlüssel zum effizienten System

Um die benötigte Sendeleistung für die Datenübertragung gering zu halten, ist eine möglichst kurze Distanz zwischen den beiden Antennen von Vorteil. Mit der von FRIWO eingesetzten Antennenstruktur ist es möglich, die Übertragung über dünne Folien im Zentrum des Energieübertragungssystems durchzuführen. Die auf Folien gedruckten Antennenstrukturen werden dazu jeweils zwischen Energieübertragungsspule und Gehäusewand platziert. Da diese Folien im Vergleich zu den Gehäusewänden mehr als dünn sind, haben sie einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf den Abstand zwischen den Energieübertragungsspulen. Auf diesem Weg wird für die Datenkommunikation notwendige Antennenplatzierung im Gesamtsystem kaum zusätzlicher Platz benötigt.

Da sowohl die Energie- als auch die Datenübertragung die induktive Kopplung nutzen, würde es ohne weitere Maßnahmen durch die räumliche Überlagerung zu einem Übersprechen der beiden Übertragungen kommen. Um dies zu verhindern, setzt FRIWO für die Datenübertragung eine spezielle Antennengeometrie ein. Mit dem Ziel einer ausreichend guten Entkopplung der beiden Übertragungssysteme wurde ein entsprechendes Verfahren für die Auslegung der Übertragungsspulen entwickelt. Dieses Verfahren macht den Einsatz aufwendiger Filter verzichtbar, was den Vorteil mit sich bringt, eine Datenübertragung auch nachträglich ohne Beeinflussung der Energieübertragung in ein kontaktloses System implementieren zu können. Außerdem wirkt sich der Entfall von Filtersystemen positiv auf die Übertragungseffizienz aus.

Die im System eingesetzten Antennen sind mit einer Beschaltung versehen, welche die Modulierung der zu übertragenden Daten übernimmt. Diese Schaltung kann direkt mit einem Mikrocontroller verbunden werden und unterscheidet sich von einer direkten Drahtverbindung nur durch die Latenzzeit (weniger als $5\mu\text{s}$) sowie durch die Potentialtrennung. Mit diesem Aufbau können Daten mit einer Rate von 1Mbit/s bidirektional

übertragen werden – unabhängig davon, ob die Energieübertragung aktiv ist oder nicht. Diese Datenübertragungsgeschwindigkeit ist zur effektiven Parameterregelung während eines Ladevorgangs mehr als ausreichend und bietet darüber hinaus Reserven für den Austausch weiterer Daten

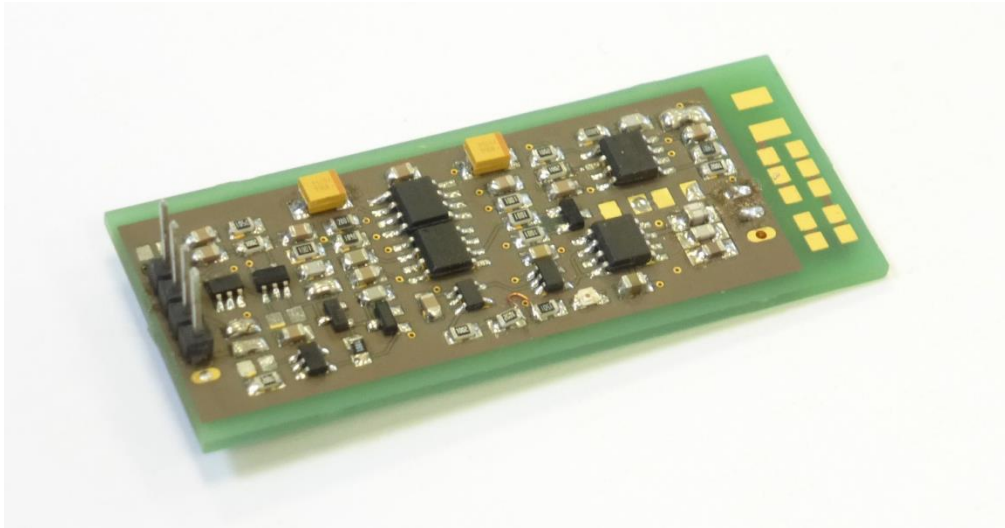


Abbildung: Kommunikationsmodul für die Datenübertragung

Fazit

Kontaktlose Energieübertragung und Effizienz befinden sich keineswegs im Widerspruch. Mithilfe des Einsatzes einer parallelen Datenübertragung ist die effiziente Energieübertragung auch ohne Kontakte nur eine Frage des richtigen Systems. Ein System wie das geschilderte bietet über die Effizienzsteigerung hinaus vielfältige Vorteile, von denen nur einige genannt wurden. Die eingesetzte Datenübertragung ermöglicht nicht nur eine effiziente kontaktlose Ladung für Geräte höherer Leistungsklassen, sondern verbreitert durch die Kommunikationsmöglichkeiten auch das Anwendungsspektrum dieser Technik.



Der Autor

M.Sc. Andreas Hagemeyer arbeitet seit 2008 bei FRIWO und hat im Rahmen eines dualen Studiums an der FHWT Oldenburg (B.Eng.) und an der Universität Duisburg-Essen (M.Sc.) Elektrotechnik studiert. Im Rahmen seiner Tätigkeit bei FRIWO setzte er sich intensiv mit der Auslegung und Optimierung kontaktloser Energiesysteme auseinander.