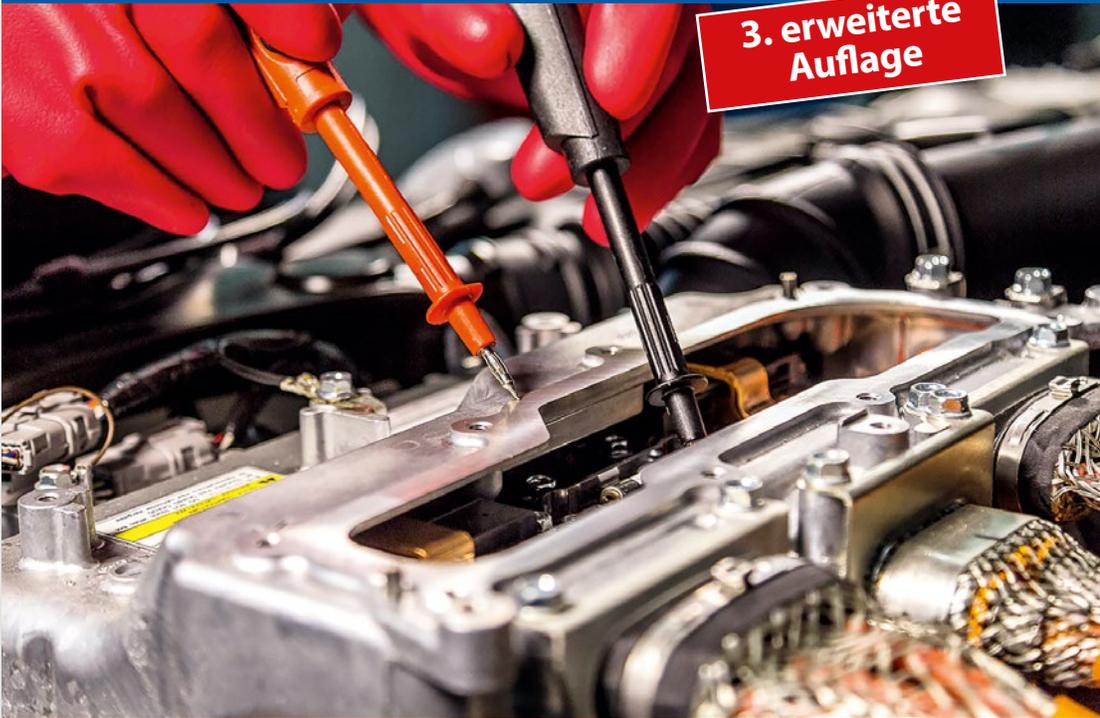


Krafthand-Technik

Grundlagen Kfz-Hochvolttechnik

3. erweiterte
Auflage



Basiswissen, Komponenten, Sicherheit

Martin Frei

Krafthand Medien GmbH

ISBN 978-3-87441-163-9

Martin Frei

Grundlagen Kfz-Hochvolttechnik

Basiswissen, Komponenten, Sicherheit

3. erweiterte Auflage

Krafthand Medien GmbH
Bad Wörishofen



Bibliografische Informationen der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://www.portal.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-87441-163-9

3. erweiterte Auflage, Januar 2018

Autor: Martin Frei

Realisierung/Lektorat: Georg Blenk

Titelgestaltung/Layout: Martin Dörfler

Titelbild: Simon Ledermann

Bilder/Grafiken: Martin Frei, Continental, Blenk Georg, Hyundai

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Kessler Druck + Medien GmbH & Co. KG, Bobingen

Printed in Germany

Alle Rechte vorbehalten

© Krafthand Medien GmbH

Walter-Schulz-Straße 1 · 86825 Bad Wörishofen

Telefon (08247) 3007-0 · Telefax (08247) 3007-70

info@krafthand.de · www.krafthand-medien.de

Geschäftsleitung: Gottfried Karpstein, Andreas Hohenleitner, Steffen Karpstein

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne die Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeisung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

*Bild- und Grafikmaterial – insbesondere grafische Darstellungen – welches nicht gesondert mit einem Quellverweis versehen ist, ist dem Autor Martin Frei zuzuordnen.

Inhalt

Vorwort.....	7
1. Die Gefahren des elektrischen Stroms	9
1.1 Auswirkungen des Stroms auf den menschlichen Körper.....	9
1.2 Körperwiderstand und Ohmsches Gesetz.....	9
1.3 Sicherheitsregeln beim Umgang mit Hochvoltssystemen.....	11
2. Das Prinzip der Hochvoltbatterie	15
2.1 Definition Hochvolt.....	15
2.2 Reihenschaltung von Batteriezellen.....	15
2.3 Spannungspotenziale und Bezugspunkte.....	18
2.4 Komponenten der HV-Batterie.....	18
2.5 Batterietypen.....	20
2.6 Ladeverfahren.....	21
3. Das Hochvoltnetz	23
3.1 Mehr Sicherheit im IT-Netz.....	23
3.2 Potenzialausgleich durch Masseverbindungen.....	27
3.3 Isolationswächter.....	28
3.4 Pilotlinie, Sicherheitslinie, Interlock.....	28
3.5 HV-eigensichere Fahrzeuge.....	30
4. Spannungsfreischaltung des HV-Systems	33
4.1 Freischalten.....	33
4.2 Gegen Wiedereinschalten sichern.....	36
4.3 Spannungsfreiheit feststellen.....	37
4.4 Prüfungen vor der Wiederinbetriebnahme.....	40
5. Der Elektromotor	45
5.1 Elektromotorisches Prinzip.....	45
5.2 Gleichstrommotor.....	50
5.3 Wechselstrommotor.....	54
5.4 Synchronmotor.....	58
5.5 Asynchronmotor.....	60

6. Leistungselektronik	65
6.1 Hoch- und Tiefsetzen der HV-Spannung.....	66
6.2 Der Inverter.....	69
6.3 Rekuperation.....	71
6.4 DC/DC-Wandler.....	74
7. Die Brennstoffzelle	77
8. Das 48-V-Bordnetz	85
9. Qualifikationen zur Arbeit an HV-Systemen	91
10. Ausblick	93
Über den Autor.....	95
Stichwortverzeichnis.....	97

Vorwort

Über die Zukunft des Automobils wurde in den vergangenen Jahren viel diskutiert. Stirbt der Verbrennungsmotor aus, wird die kommende Pkw-Generation rein elektrisch fahren, ist der Hybridantrieb nur eine reine Übergangstechnologie? Antworten auf diese Fragen wird die Zeit bringen. Sicher ist allerdings, dass die Fahrzeughersteller ihre Produktpaletten erweitert haben und verstärkt auch Hybrid- und Elektrofahrzeuge anbieten – mit steigender Tendenz. Toyota setzt im Übrigen mit dem Prius bereits seit über zwanzig Jahren auf die Hybridtechnologie.

Sowohl Hybridfahrzeuge als auch rein elektrisch angetriebene Pkw besitzen eine elektrische Maschine, die für den Vortrieb sorgt oder ihn unterstützt. Das bedeutet allerdings auch, dass die E-Maschine eine ausreichende mechanische Leistung abgeben muss. Um diese mechanische Energie zu erzeugen, wird eine hohe elektrische Energie benötigt. Elektro- und Hybridfahrzeuge sind demnach mit elektrischen Komponenten versehen, die große elektrische Energien speichern und verarbeiten können. Dadurch entstehen neue Gefahrenpotentiale. Ein unsachgemäßer Umgang mit diesen Fahrzeugen kann nicht nur zu Schäden am Fahrzeug sondern auch zu Verletzungen führen. Bereits einfachste Arbeiten am Auto, die unter Umständen gar nichts mit dem Hochvoltssystem zu tun haben, können im Zweifel zu schwersten Verletzungen bis hin zum Tod des Me-

chatronikers führen. Das erste Kapitel beschäftigt sich aus diesem Grund ausführlich mit der Thematik und den Sicherheitsbestimmungen. Die nachfolgenden Kapitel stellen in aller Ausführlichkeit die funktionalen Grundlagen von Hochvoltssystemen vor.

Neu in dieser vorliegenden, dritten Auflage sind die Kapitel sieben und acht, die sich mit der Brennstoffzelle sowie dem 48-V-Bordnetz beschäftigen. Mit ix35 und dem Mirai haben Hyundai und Toyota bereits jeweils ein Brennstoffzellenfahrzeug in Serie für Endkunden vorgestellt. Das Thema ist äußerst interessant. Brennstoffzellen haben einen wesentlich höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren, bei sehr günstigen Emissionswerten. Der entscheidende Vorteil liegt in der vordergründigen Emission von Wasserdampf.

Im Falle eines 48-V-Bordnetzes handelt es sich genau genommen nicht um ein Hochvoltssystem. Es bietet jedoch viele Vorteile. So lassen sich zum Beispiel Kabelquerschnitte verringern, wodurch die Fahrzeuge leichter werden. Auch eine Hybridisierung des Antriebsstrangs sowie kraftstoffsparende Zusatzfunktionen sind möglich.

Ich wünsche Ihnen nun viel Freude bei der Lektüre dieses Buches. Auf meiner Website www.martinfrei.de finden Sie wei-

tere Informationen zu kraftfahrzeugtechnischen Themen. Im Forum können Sie gerne mit mir und anderen in Kontakt treten. Bei Fragen stehe ich Ihnen jeder Zeit zur Verfügung und freue mich über Ihre Rückmeldung zum vorliegenden Buch.

Abschließend möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung des Buches unterstützt haben – nicht zuletzt bei Herrn Georg Blenk von der Krafthand Medien GmbH. Mein Dank gilt ausdrücklich auch meiner Frau. Sie hat den Produktionsprozess mit viel Geduld und Nachsicht mitgetragen.

Mit freundlichen Grüßen



Martin Frei

3. Das Hochvoltnetz

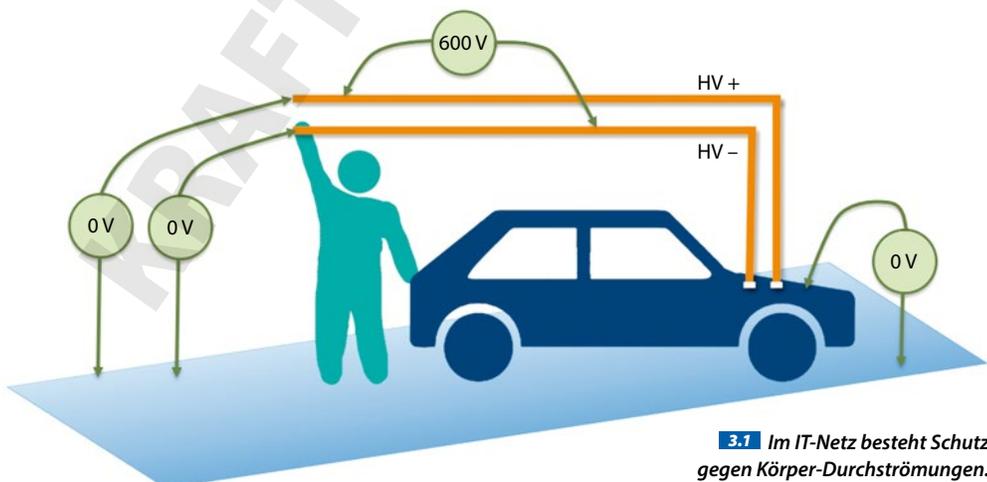
3.1 Mehr Sicherheit im IT-Netz

Das HV-System wird im sogenannten IT-Netz realisiert. Das Besondere an diesem Netz ist, dass keine Verbindung zwischen den HV-Leitungen und den Gehäusen der Komponenten beziehungsweise der Fahrzeugkarosserie besteht. Im 12-V-Bordnetz wird der Minuspol der Batterie mit der Karosserie verbunden, im HV-Netz nur die Komponentengehäuse mit der Fahrzeugmasse. Die Leitungen sind komplett vom Fahrzeug getrennt. Es besteht also keine Spannung zwischen einer HV-Leitung und der Fahrzeugmasse oder der Erde. Damit kommt es nicht zu gefährlichen Körper-Durchströmungen, solange nur eine Spannung führende Leitung berührt wird.

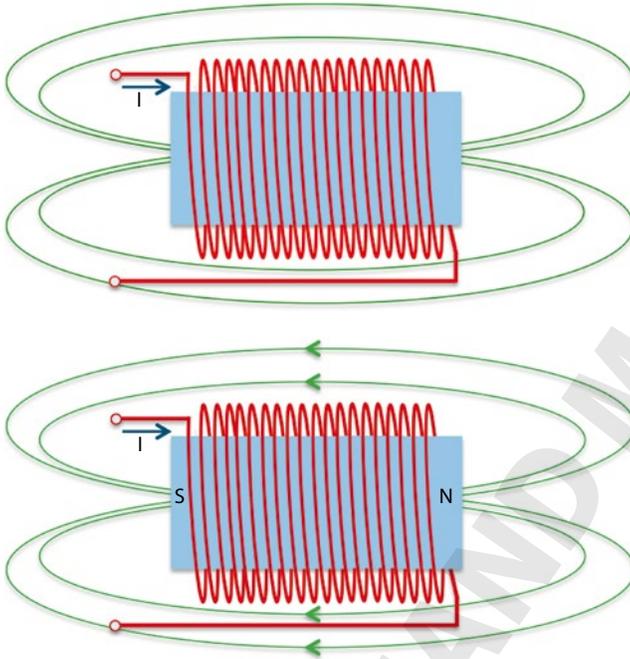
Damit das HV-Netz keine Verbindung zum 12-V-Bordnetz hat, müssen beide Netze galvanisch voneinander getrennt werden. Galvanische Trennung bedeutet, dass es keine leitende Verbindung zwischen Spannung führenden Systemen gibt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine galvanische Trennung zwischen unterschiedlichen Stromkreisen zu realisieren. Am häufigsten kommt ein Transformator zum Einsatz.

Transformator

Ein Transformator besteht in der Regel aus zwei Spulen und einem Eisenkern. Eine Spule wiederum ist ein aufgewickelter Kupferdraht. Fließt ein Gleichstrom durch diesen Draht, entsteht in der Spule ein



3.1 Im IT-Netz besteht Schutz gegen Körper-Durchströmungen.



3.2 Magnetfeld einer von Strom durchflossenen Spule.

3.3 Die Magnetfeldlinien treten aus dem Nordpol aus und in den Südpol ein.

Magnetfeld – weshalb eine Spule auch als Elektromagnet bezeichnet wird. Wickelt man eine Spule um einen Eisenkern, so wird das Magnetfeld der Spule ausgerichtet und man erhält an den Enden ein stärkeres Feld.

Hier entstehen ein magnetischer Nord- und ein magnetischer Südpol. Die Feldlinien treten dabei aus dem Nordpol aus und in den Südpol ein.

Wird die Spannungsquelle, die an der Spule angeschlossen ist, umgedreht (also Plus- und Minuspol vertauscht), fließt der Strom auch in der Spule andersherum. Die Magnetfeldlinien zeigen nun in die andere Richtung. Eine Umkehr der Stromrichtung

hat einen Wechsel der Nord- und Südpole zur Folge.

Wechselspannung

Eine Spannung, die ständig ihre Polarität wechselt, nennt man Wechselspannung. Durch die permanente Änderung der Polarität ändert sich im gleichen Maß auch die Richtung des Stromflusses. Wechselspannungen können unterschiedliche Formen annehmen. Am weitesten verbreitet ist die sinusförmige Wechselspannung.

Bild 3.4 zeigt den zeitlichen Verlauf einer sinusförmigen Wechselspannung. Die Zeit T beschreibt die Periodendauer, also die Zeit, die benötigt wird, um das Signal

zu wiederholen. Somit gibt die Periodendauer an, wie lange eine vollständige Schwingung dauert. Mithilfe der Periodendauer lässt sich die Frequenz eines Spannungssignals bestimmen.

Berechnung der Frequenz einer Wechselspannung: $f = \frac{1}{T}$

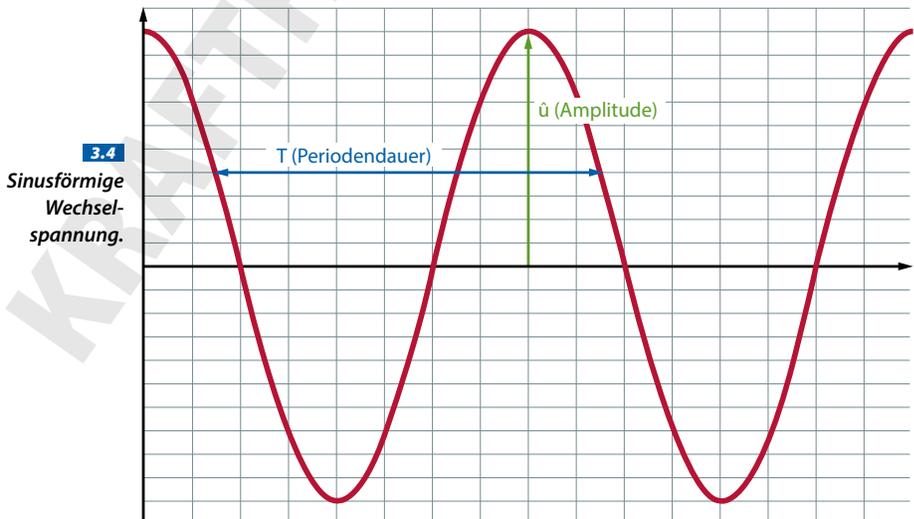
$f \rightarrow$ Frequenz
 $T \rightarrow$ Periodendauer

Die Frequenz eines Signals beschreibt, wie viele vollständige Schwingungen dieses Signals in einer Sekunde auftreten. Die Einheit der Frequenz ist das Hertz (Hz). Bei einer sinusförmigen Wechselspannung mit einer Frequenz von 100 Hz erhalten wir pro Sekunde also 100 vollständige Schwingungen.

Der Scheitelwert \hat{u} der Sinusspannung wird auch Spitzenwert U_s oder einfach Amplitude genannt. Dieser Wert ergibt sich aus dem maximalen Abstand der Spannungskurve zur Nulllinie. Der Effektivwert U_{eff} der Wechselspannung gibt den Spannungswert an, den eine Gleichspannung haben müsste, um in einem Verbraucher genauso viel Wärme umzusetzen. Spricht man von Wechselspannungswerten (zum Beispiel von 230 V im Haushalt), dann ist immer der Effektivwert gemeint. Durch den Spitzenwert einer Sinusspannung lässt sich leicht der Effektivwert der Spannung berechnen.

Berechnung des Effektivwerts einer Wechselspannung: $U_{eff} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$

$U_{eff} \rightarrow$ Effektivwert der Spannung
 $\hat{u} \rightarrow$ Amplitude der Spannung



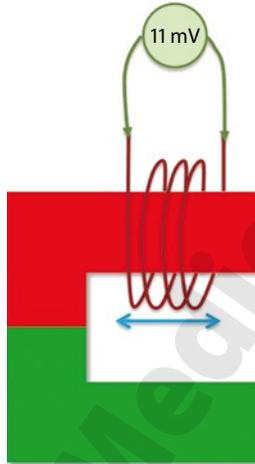
3 Das Hochvoltnetz

Spulen im Magnetfeld

Wird eine Leiterschleife innerhalb eines festen Magnetfelds bewegt, entsteht in ihr eine Spannung. Diesen Vorgang nennt man Spannungsinduktion.

Nimmt man anstelle der Leiterschleife eine Spule, so befinden sich nicht nur eine, sondern mehrere Windungen innerhalb des Magnetfelds. Der Wert der erzeugten Spannung nimmt zu, obwohl der Magnet der gleiche ist und die Spule mit derselben Geschwindigkeit bewegt wird. Die sogenannte Induktionsspannung kann noch weiter erhöht werden, indem die Spule schneller bewegt oder ein stärkerer Magnet verwendet wird.

Diese Eigenschaft des Elektromagnetismus – dass nämlich eine Spannung durch ein wechselndes Magnetfeld erzeugt werden kann – nutzt man bei einem Transformator. Wird eine Spule des Transformators mit Wechselspannung versorgt, so baut sich in ihr – durch den Wechselstrom – ein ständig wechselndes Magnetfeld auf. Dieses wechselnde Magnetfeld umschließt auch die zweite Spule, in der daraufhin eine Spannung erzeugt wird.

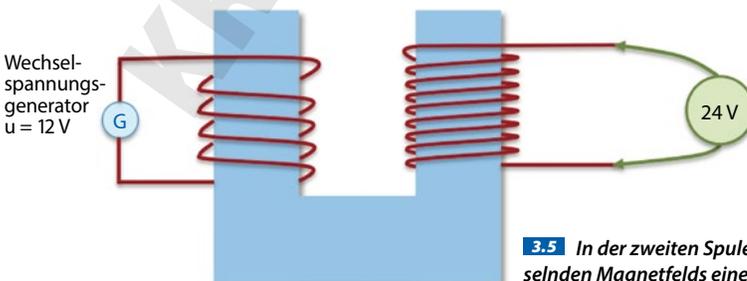


3.5 Durch Bewegung wird in der Leiterschleife eine Spannung erzeugt.

Induktionsspannung

Die Höhe einer Induktionsspannung ist abhängig von

- der Anzahl der Windungen, die sich in einem Magnetfeld befinden;
- der Stärke des Magnetfelds;
- der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfelds.



3.5 In der zweiten Spule wird aufgrund des wechselnden Magnetfelds eine Spannung erzeugt.

Die Höhe der Spannung am Ausgang des Trafos ist maßgeblich von der Windungszahl der zweiten Spule abhängig. Vernachlässigt man Verluste, ergibt sich für die Spannung am Ausgang der folgende Zusammenhang.

Berechnung der Ausgangsspannung eines Transformators:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad u_2 = u_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

u_1 → Eingangsspannung des Transformators

u_2 → Ausgangsspannung des Transformators

n_1 → Anzahl der Windungen der Eingangsspule

n_2 → Anzahl der Windungen der Ausgangsspule

Mit einem Transformator lassen sich demnach nicht nur Spannungsnetze galvanisch voneinander trennen. Vielmehr können Spannungswerte auch hoch- beziehungsweise heruntergesetzt werden. Wie in Kapitel 6.3 gezeigt wird, kann der HV-Motor beim Bremsen zur Energiegewinnung verwendet werden. Die Spannung, die dabei erzeugt wird, kann je nach System durchaus über 400 V betragen. Soll damit eine 12-V-Bordnetzbatterie geladen werden, so muss die Spannung mit einem Transformator heruntergesetzt werden. Die Windungszahl der Ausgangsspule muss dabei kleiner als die der Eingangsspule sein. Geht man davon aus, dass die Eingangsspule 10.000 Windungen besitzt, lässt sich die Windungszahl der Ausgangsspule berechnen:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{u_2}{u_1} = 10.000 \cdot \frac{14 \text{ V}}{400 \text{ V}} = 350$$

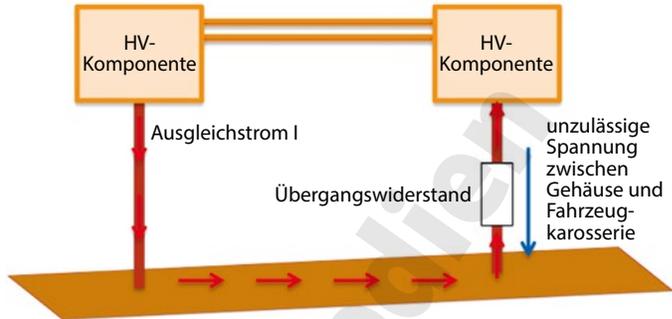
Vernachlässigt man, dass die Ausgangsspannung zum Laden der Bordnetzbatterie noch gleichgerichtet werden muss, sollte die Spule 350 Windungen besitzen. Das Beispiel zeigt: Mithilfe unterschiedlicher Windungszahlen eines Transformators können Wechselspannungen beliebig hoch- beziehungsweise heruntergesetzt werden. Gleichzeitig haben die Eingangs- und Ausgangsspannungen keinen gemeinsamen Bezug, sie sind galvanisch voneinander getrennt.

3.2 Potenzialausgleich durch Masseverbindungen

Ein weiterer Sicherheitsaspekt ist ein durchgängiger Potenzialausgleich zwischen den einzelnen Hochvolt-Komponenten. Hierzu werden die Gehäuse aller Komponenten des HV-Systems miteinander verbunden, damit an ihnen keine Potenzialunterschiede auftreten können. Dies ist ein wichtiger Schutz gegen elektrische Stromschläge und wird durch Massebänder oder direktes Verschrauben der jeweiligen Gehäuse mit der Fahrzeugkarosserie realisiert. Beim Überprüfen einer HV-Anlage ist darauf zu achten, dass keine nennenswerten Widerstände zwischen dem Gehäuse einer HV-Komponente und der Fahrzeugmasse auftreten. Sollte dies der Fall sein,

3 Das Hochvoltnetz

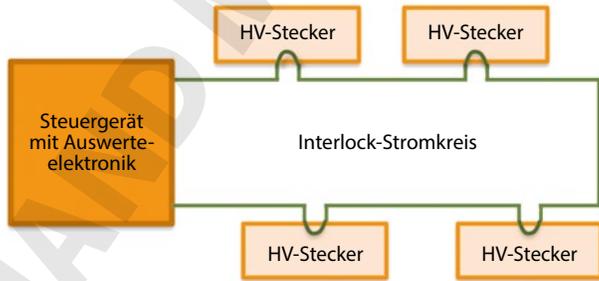
könnte im Fehlerfall bereits eine unzulässig hohe Spannung entstehen, die sich unter Umständen gefährlich auswirken kann. Bei bestimmten Fehlern kann es zu Ausgleichsströmen zwischen HV-Komponenten kommen. Befinden sich diese Komponenten nicht auf demselben Potenzial, gibt es also zwischen ihnen Übergangswiderstände, so treten dort Spannungen auf.



3.6 Bei einem Ausgleichsstrom fällt eine Spannung am Übergangswiderstand an.

3.3 Isolationswächter

Um Fehler rechtzeitig zu erkennen, werden Isolationswächter installiert. Dabei werden Spannungssignale auf die HV-Plus- und HV-Minus-Leitung gegeben. Die Signale haben als Bezug die Karosserie. Da es zwischen den HV-Leitungen und der Fahrzeugmasse keine Verbindung geben soll, darf bei der Prüfung auch kein Strom fließen. Wird vom Isolationswächter ein Strom registriert, öffnen sich die Trennrelais in der HV-Batterie und das HV-Netz wird abgeschaltet.



3.7 Eine Leiterschleife überwacht alle lösbaren Verbindungen.

3.4 Pilotlinie, Sicherheitslinie, Interlock

Im HV-Netz werden alle Gehäuse, alle Abdeckungen und alle Stecker mit einer zusätzlichen Niedervolt-Leitung versehen.

Im Prinzip handelt es sich dabei um eine Leiterschleife, die alle lösbaren Komponenten des Systems überwacht. Je nach Hersteller wird diese Leiterschleife Interlock, Pilotlinie oder auch Sicherheitslinie genannt. Gemeint ist allerdings immer das Gleiche. Werden zum Beispiel Gehäusedeckel oder Steckverbindungen gelöst, so erkennt dies die Sicherheitslinie und die Trennrelais schalten die HV-Spannung ab.

Der Interlock-Stromkreis ist nur geschlossen, wenn alle lösbaren Verbindungen fest verbunden sind. Ist das nicht der Fall, kann das HV-System nicht arbeiten

und die Spannung auch nicht zugeschaltet werden. Eine Interlock-Verbindung kann als Stecker oder auch als einfache Brücke in einem Stecker ausgeführt sein.

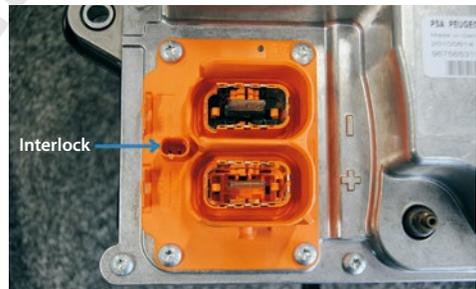
Bild 3.8 zeigt den Gehäusedeckel eines Inverters. Durch Abnehmen des Deckels wird automatisch die Steckverbindung, in der eine Kontaktbrücke verbaut ist, gelöst. Die Interlock-Schleife wird unterbrochen und das HV-System abgeschaltet. Auch die HV-Steckverbindungen werden durch den Interlock-Stromkreis überwacht, sodass beim Lösen der Stecker keine HV-Spannung mehr anliegt.

In Bild 3.9 ist deutlich zu erkennen, dass neben den beiden großen HV-Plus- und HV-Minus-Kontakten noch zwei weitere kleine Kontakte vorhanden sind. Dabei handelt es sich um die Kontakte der Interlocklinie. Wird der Stecker wie im Bild entfernt, so wird auch die Kontaktbrücke der Pilotleitung abgezogen. Der mechanische Aufbau dieser Kontaktbrücke gewährleistet, dass immer zuerst die Interlock-Leitung unterbrochen wird, bevor der Kontakt der HV-Steckverbindung geöffnet wird.

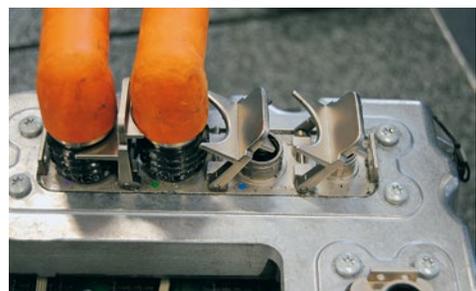
Eine mechanische Absicherung zeigt Bild 3.10. Die mit den farbigen Punkten versehenen Kontakte sind für HV-Leitungen. Der Kontakt ganz rechts beinhaltet die Interlockbrücke. Durch die mechanische Verriegelung ist es nicht möglich, eine HV-Leitung zu lösen, ohne zuerst den Interlock-Stecker gezogen zu haben. Selbst der Trennstecker einer HV-Batterie wird in der Regel mit einem Interlock-Kontakt versehen.



3.8 Interlock-Brücke als einfache Steckverbindung im Gehäusedeckel.



3.9 Interlock-Brücke im Steckkontakt.



3.10 Durch die mechanische Verriegelung muss der Interlock-Stecker als erstes gezogen werden.

6. Leistungselektronik

Die ersten Elektromotoren entstanden bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Daraus entwickelten sich auch schnell die ersten Elektrofahrzeuge. Erst in den frühen 1920er-Jahren verdrängten Verbrennungsmotoren den elektrischen Antrieb im Fahrzeug. Verbrennungsmotoren hatten zwei wesentliche Vorteile: Zum einen konnte im Kraftstoff deutlich mehr Energie gespeichert und zum anderen die Drehzahl wesentlich besser eingestellt werden. An der Frage der Energiespeicherung wird sich in Zukunft entscheiden, ob sich Elektrofahrzeuge durchsetzen. Die Entwicklung wird hier in den nächsten Jahren die größten Schritte machen müssen. Das Problem der Regelung von Elektromotoren ist allerdings gelöst. Mit der aktuellen Leistungselektronik ist es sogar möglich, Elektrofahrzeuge ohne Getriebe zu bauen, da Elektromotoren durch eine gezielte Ansteuerung über den geforderten Drehzahlbereich arbeiten

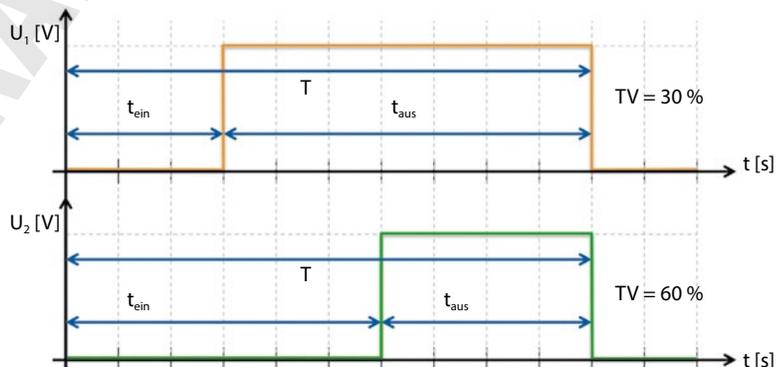
Spektrum der Elektronik

Diese Aufgaben erfüllt die Leistungselektronik in Elektrofahrzeugen:

- Hoch- und Tiefsetzen der HV-Spannung,
- Ansteuerung des Elektromotors,
- Energierückgewinnung und Laden der HV-Batterie,
- entkoppeln des HV-Netzes und Laden der 12-V-Batterie.

können. Die Leistungselektronik in Elektrofahrzeugen übernimmt aber zusätzlich auch noch andere Aufgaben.

Wesentliches Bauteil der Leistungselektronik ist ein sogenannter IGBT: eine Kombination aus bipolarem und unipolarem



6.1 Ansteuerung über PWM-Signale.

Transistor, also aus herkömmlichem Transistor und MOSFET (weitere Informationen über beide Transistoren finden sich im Buch ‚Grundlagen der Fahrzeugelektrik‘, erschienen bei Krafthand Medien). Ein IGBT vereint die Vorteile beider Transistoren, wird beinahe leistungslos angesteuert und kann Ströme bis fast 4.000 A schalten.

PWM-Ansteuerung

In den meisten Fällen werden die Hochleistungsschalter (IGBT) mit PWM-Signalen angesteuert, einer besonderen Form der Rechteckspannung – wobei im Betrieb die Frequenz und somit die Periodendauer des Signals konstant bleibt und sich nur die Ein- und Ausschaltzeiten des Signals verändern. Ein PWM-Signal wird über das Tastverhältnis definiert. Dieses Verhältnis gibt an, um wie viel Prozent des gesamten Signals der angesteuerte Verbraucher eingeschaltet ist:

$$TV = \frac{t_{ein}}{T}$$

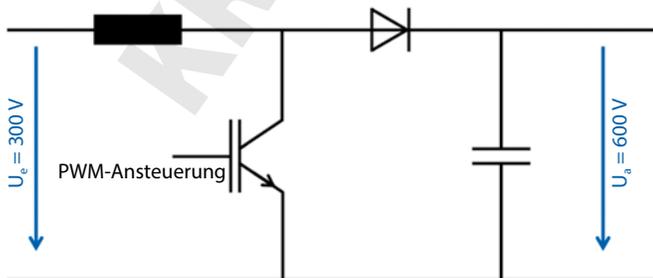
Der Vorteil einer PWM-Steuerung ist, dass Transistoren, MOSFET oder IGBT im-

mer voll durchgeschaltet oder voll gesperrt werden. Dadurch entstehen deutlich weniger Wärmeverluste an der Schaltstrecke.

6.1 Hoch- und Tiefsetzen der HV-Spannung

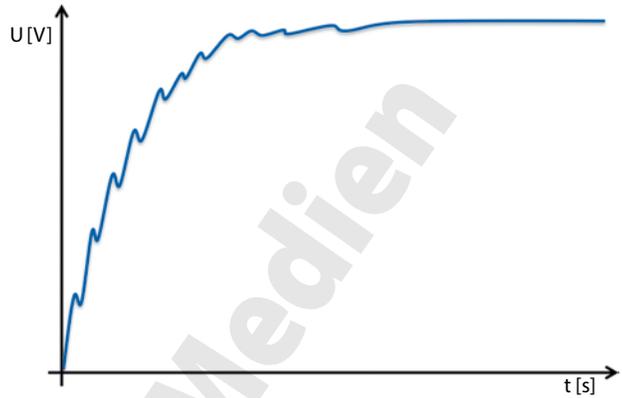
Um den großen Wirkungsgrad von Elektromotoren wirklich erreichen zu können, müssen sie mit einer hohen Spannung betrieben werden. Diese liegt in der Regel über der Spannung der HV-Batterie. Die Spannung muss also für den Betrieb oftmals erhöht werden. Mit einer einfachen Schaltung und geeigneten Bauteilen lassen sich Hoch- und Tiefsetzer mit einem sehr hohen Wirkungsgrad realisieren. Dieser kann deutlich über 90 Prozent betragen.

Beim Hochsetzer – auch ‚Hochsetzsteller‘ oder ‚Boost-Converter‘ genannt – wird der Leistungstransistor mit einem PWM-Signal angesteuert. Sobald der Transistor durchschaltet, fließt ein Strom von der Batterie durch die Spule und wieder zurück zur Batterie. Dieser Strom erzeugt in der Spule ein Magnetfeld. Sobald der Transistor sperrt, wird der Strom durch die Spule



6.2 Diese einfache Schaltung kann Spannungen erhöhen.

unterbrochen. Das Magnetfeld bricht zusammen und erzeugt in der Spule eine hohe Spannung. Diese Spannung ist nun so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegen wirkt. War vorher auf der rechten Seite der Spule noch Minus, so ist dort jetzt Plus. Die Diode ist nun in Durchlassrichtung geschaltet und die hohe Induktionsspannung wird genutzt, um den Kondensator aufzuladen. Da die Energie nicht ausreicht, um den Kondensator auf die gewünschte Spannung zu laden, schaltet der Transistor wieder durch. Die Spule wird wieder aufgeladen. Beim anschließenden Abschalten des Stroms wird wieder die Induktionsspannung verwendet, um den Kondensator aufzuladen. Da der Transistor mit variablem Tastverhältnis getaktet wird, kann auf diese einfache Art die Höhe der Ausgangsspannung eingestellt werden. Die Diode sorgt lediglich dafür, dass kein Strom vom Kondensator zurückfließen kann.

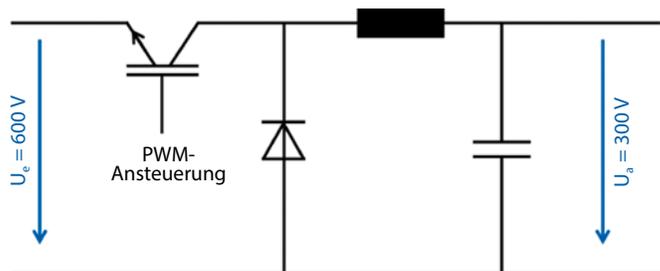


6.3 Die Spannung wird ‚aufgepumpt‘.

Bild 6.3 zeigt deutlich, wie sich der Spannungswert in kürzester Zeit (weniger als eine Millisekunde) auf die erforderliche Höhe einstellt. Diese Spannung kann nun verwendet werden, um mit der Leistungselektronik den Elektromotor anzusteuern.

Ein wesentlicher Aspekt zum Energiehaushalt und somit zur Reichweite eines Elektrofahrzeugs ist die Rückgewinnung der Energie im Schubbetrieb und beim Bremsen. Bei herkömmlichen Fahrzeugen

6.4 Ein Tiefsetzer kann den Spannungswert herabsetzen.



6 Leistungselektronik

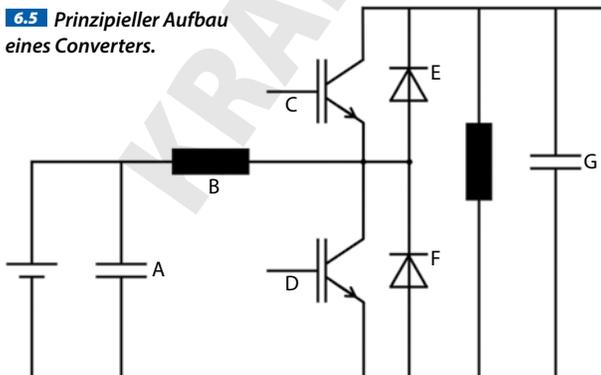
wird diese Energie einfach nur in Wärme umgewandelt und an die Außenluft abgegeben. Im Elektrofahrzeug wird die Rückgewinnung durch den Generator oder auch den Elektromotor, der dann als Generator fungiert, realisiert (mehr dazu in Kapitel 6.3). Die Spannung, die beim Bremsen erzeugt wird, kann unterschiedliche hohe Werte annehmen. Um die HV-Batterie nicht unnötig stark zu belasten, muss diese Spannung gegebenenfalls nach unten gesetzt werden.

Diese Aufgabe übernimmt ein Tiefsetzer. Diese einfache Schaltung wird häufig auch als ‚Tiefsetzsteller‘ oder ‚Buck-Converter‘ bezeichnet. Und auch diese Schaltung arbeitet mit sehr hohem Wirkungsgrad. Der elektronische Schalter wird wieder mit einem PWM-Signal angesteuert. Sobald der Transistor öffnet, fließt ein Strom durch den Transistor und die Spule in die Batterie. Die Diode ist in diesem Fall in Sperrrichtung geschaltet. Die Spannung an der Spule ist im ersten Mo-

ment hoch und wird immer kleiner, solange ein Strom fließt. Die Ausgangsspannung ergibt sich aus der Differenz zwischen Eingangsspannung und Spannung an der Spule. Hat die Ausgangsspannung den gewünschten Wert erreicht, schaltet der Transistor ab. Es fließt nun kein Strom mehr durch die Spule, sodass das dort erzeugte Magnetfeld zusammenbricht. Die Spannung an der Spule kehrt sich nun um. Nun kann ein Strom vom rechten Spulenanschluss durch den Glättungskondensator und die Batterie über die nun in Durchlass geschaltete Diode zum linken Anschluss der Spule fließen. Auf diese Art lässt sich die Ausgangsspannung auf einen beinahe beliebigen Wert einstellen, der nur vom Wert der Eingangsspannung abhängig ist und vom Tastverhältnis, mit dem der Transistor angesteuert wird:

$$U_a = \frac{t_{ein}}{T} \cdot U_e$$

6.5 Prinzipieller Aufbau eines Converters.



- A = Kondensator-Tiefsetzer
- B = Drossel
- C = IGBT-Tiefsetzer
- D = IGBT-Hochsetzer
- E = Diode-Hochsetzer
- F = Diode-Tiefsetzer
- G = Kondensator-Hochsetzer

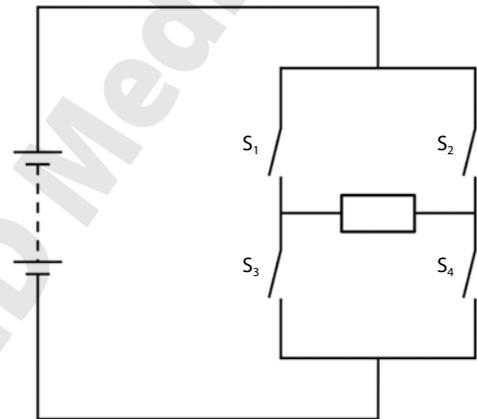
Der Kondensator dient zum Glätten der Ausgangsspannung. Wird der Tiefsetzsteller direkt an eine Batterie angeschlossen, kann auf den Kondensator verzichtet werden.

Im sogenannten ‚Converter‘ werden beide Schaltungen miteinander verbunden. Das Prinzip bleibt aber dasselbe: Die Spannung wird hoch- oder heruntergesetzt – je nachdem, welcher der Transistoren angesteuert wird.

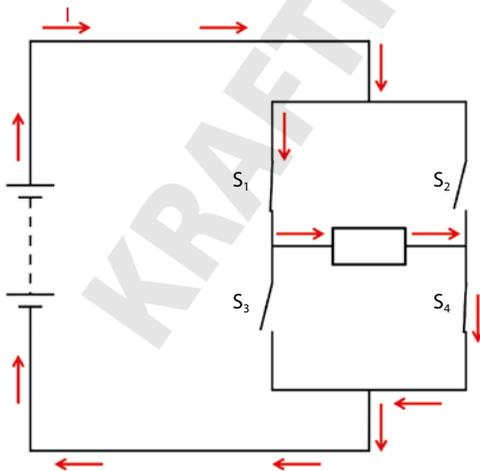
6.2 Der Inverter

In Elektro- und Hybridfahrzeugen werden überwiegend Drehstrommotoren verwendet. Diese benötigen eine Drei-Phasen-Wechselspannung, um arbeiten zu können. Die HV-Batterie speichert allerdings nur Gleichspannung. Soll damit der Elektromotor betrieben werden, muss die Gleichspannung in eine Wechselspannung umge-

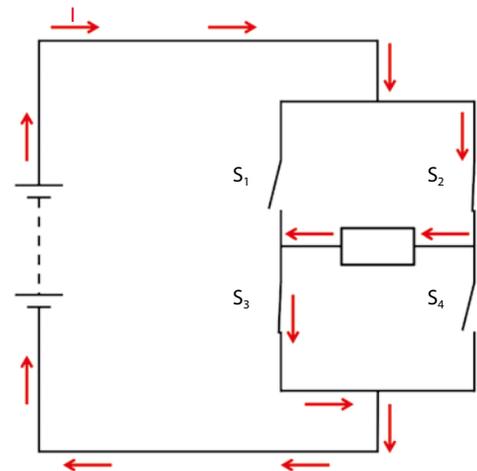
wandelt werden. Diese Aufgabe übernimmt der Inverter. Um aus einer Gleichspannung eine Wechselspannung zu erzeugen, benötigt man im Prinzip nur eine einfache Schaltung mit vier Schaltern.



6.6 Grundprinzip eines Wechselrichters.



6.7 Der Strom fließt von links nach rechts.



6.8 Der Strom wechselt die Richtung.

Grundlagen Kfz-Hochvolttechnik Basiswissen, Komponenten, Sicherheit

3. erweiterte Auflage

Mit dem Werk ‚Grundlagen Kfz-Hochvolttechnik‘ liefert Martin Frei das nötige elektrotechnische Basiswissen für den automobilen Hochvolt-Spezialisten. Frei setzt dabei – wie bereits in seinem Erfolgsbuch ‚Grundlagen der Fahrzeugelektrik‘ – auf eine einfache und klare Sprache sowie auf anschauliche Beispiele.

Zu Beginn leitet der Autor mit den Gefahren des elektrischen Stroms im Allgemeinen über zum eigentlichen Prinzip der Hochvoltbatterie. Er beschreibt die Wirkungsweise, die Einzelkomponenten sowie verschiedene Ladeverfahren. Im Nachgang geht Frei auf das Hochvoltnetz selbst ein und erklärt unter anderem Begriffe wie Pilotlinie, Interlock oder Potenzialausgleich. Freischalten, Absichern und Überprüfen des HV-Bordnetzes sind Themen eines weiteren Kapitels, um dann direkt auf die Funktionsweisen von Elektromotoren sowie Generatoren einzugehen.

Das Kapitel ‚Inverterschaltungen, Leistungselektronik‘ setzt auf die elektrotechnischen Grundlagen und Komponenten auf und liefert Informationen zur Spannungsregelung, Gleich- und Wechselrichtern sowie zum Thema Heizen und Kühlen von HV-Komponenten. Neu sind die



Kapitel zur Brennstoffzelle sowie zum 48-V-Bordnetz. Abgeschlossen wird das Buch mit einem Kapitel zum Thema ‚Qualifikationen zur Arbeit an HV-Systemen‘.

Martin Frei

„Martin Frei ist es mit dem vorliegenden Buch gelungen ein Standardwerk zu schaffen. Er beschreibt die physikalisch-technischen Grundlagen zum Thema Hochvolt. Der Leser versteht das Thema in seiner Gesamtheit. Ich empfehle das Buch jederzeit gerne weiter.“

Tjerk Berthold
(Kfz-Technikermeister, Kfz-Berthold, Weismain)