Bei uns kommt der Strom aus der Steckdose

Elektrische Energie ist für die zivilisatorischen Errungenschaften der Wohlstandsgesellschaft so unabdingbar wie die Luft zum Atmen. Bereits ein kurzzeitiges Aussetzen der Versorgung führt zu zahlreichen Beeinträchtigungen des wirtschaftlichen und privaten Lebens. Denn in solchen Fällen gehen nicht nur die sprichwörtlichen Lichter aus, sondern es werden genauso auch Kommunikationsverbindungen und Datenverarbeitungssysteme lahm gelegt, Industrieanlagen, Bahnen und Ampelanlagen fallen aus, der Inhalt von Kühlschränken und Gefriertruhen droht zu verderben.

Elektrische Energie gilt als besonders *edel*, da sie für alle denkbaren Anwendungsfälle eingesetzt werden kann: Mit ihr lassen sich Maschinen antreiben, Licht erzeugen, Kälte und Wärme bereitstellen. Über Kabelverbindungen ist sie an jedem Ort verfügbar und damit einfacher zu transportieren als jeder andere Energieträger. Elektrische Energie – insbesondere in Form der in den Versorgungsnetzen üblichen Wechselspannung – ist jedoch nur bedingt speicherfähig. Sie kann daher nur in dem Moment genutzt werden, in dem sie auch bereitgestellt wird. Damit besteht die Notwendigkeit, zu jedem Zeitpunkt mindestens die aktuell gerade benötigte Abnahmeleistung kraftwerksseitig vorzuhalten – andernfalls träte der oben beschriebene Fall der Abschaltung von Verbrauchern ein, die ultima ratio, um Versorgungsinfrastrukturen vor dauerhaften Schäden zu bewahren.

Grund genug also, sich über die Bereitstellung elektrischer Energie und deren Weg zum Verbraucher ein genaueres Bild zu verschaffen.

Alles über Strom. Christian Synwoldt
Copyright © 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
ISBN 978-3-527-32373-9

Elektrischer Strom aus dem Kraftwerk

In Deutschland dominiert, wie weltweit in anderen Industriegesellschaften auch, die zentrale Bereitstellung von Elektrizität in Kraftwerken. Kraftwerkskomplexe mit einer Leistung von bis zu 1 GW oder mehr sind in der Lage, ganze Großstädte und Industrieregionen zu versorgen. In Deutschland handelt es sich dabei in erster Linie um thermische Kraftwerke: Anlagen, die mit Braun- oder Steinkohle, aber auch durch eine nukleare Kettenreaktion Wasserdampf erzeugen, der dann über Turbinen geleitet wird und Generatoren antreibt. Mehr als die Hälfte der installierten Leistung wird durch diese Art von Kraftwerken repräsentiert. Ebenfalls zur Gruppe der thermischen Kraftwerke zählen Gasturbinenkraftwerke; hier werden typischerweise Erdöl oder Erdgas als Brennstoff eingesetzt. Sie tragen zu rund einem Sechstel der installierten Leistung bei. Über einen ähnlichen Ausbaustand verfügt in Deutschland auch die Windenergie. Alle anderen Arten von Kraftwerken – inklusive Wasserkraftwerke – machen das letzte Sechstel der installierten Leistung aus.

Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die produzierte Elektrizitätsmenge nicht notwendiger Weise mit der installierten Leistung einhergeht. Ein thermisches Kraftwerk kann nicht einfach ein- oder ausgeschaltet werden, diese Anlagen laufen möglichst ununterbrochen mit hoher Leistung. Im günstigsten Fall werden sie dauernd mit ihrer Nennleistung betrieben, dann ist die Energieeffizienz – das Verhältnis aus dem Einsatz von Kohle, Öl oder Kernbrennstoff zur daraus gewonnenen Elektrizität – am höchsten.

Gasturbinen benötigen einen kostspieligeren Brennstoff. Sie sind jedoch innerhalb weniger Minuten nach einem Kaltstart betriebsbereit. Hier spielt der Gedanke der Versorgungsreserve bei Spitzenlastbedingungen eine wesentliche Rolle – weniger der kontinuierliche Betrieb. Beim Betrieb mit natürlichen Ressourcen wie bei Wind- oder Solaranlagen hängt der Beitrag zur Elektrizitätsversorgung im Wesentlichen vom aktuellen Angebot der natürlichen Ressourcen wie Wind- und Einstrahlungsbedingungen ab; ohne geeignete Speicher- oder/und Reservekapazitäten ist eine kontinuierliche Versorgung nicht möglich. Dies stellt sicherlich die einstweilen größte – jedoch

keineswegs unüberwindliche – Hürde für einen umfassenderen Einsatz dar.[1)]

Weniger bekannt ist die Tatsache, dass auch der Betrieb anderer Kraftwerke – Wasserkraftwerke, aber insbesondere auch sämtlicher Typen von thermischen Kraftwerken – von natürlichen Ressourcen abhängt: dem Wasserstand der Flüsse und auch deren Wassertemperatur. Wer sich einmal die Mühe macht, die Standorte von Kraftwerken näher zu analysieren, wird zweifellos feststellen, dass alle größeren Anlagen unmittelbar an wasserreichen Flüssen oder in Küstennähe errichtet worden sind: Die Kraftwerke benötigen enorme Mengen an Kühlwasser. Ist der Wasserpegel im Sommer zu niedrig oder die Wassertemperatur zu hoch, müssen thermische Kraftwerke entsprechend gedrosselt werden – ausgerechnet dann, wenn Klimaanlagen für Rekordbelastungen in den Netzen sorgen.

Dezentrale Kleinanlagen für die Versorgung einzelner Häuser, Siedlungen oder Gewerbebetriebe sind bislang eher noch die Ausnahme. Dabei verfügen Blockheizkraftwerke über eindeutige Vorzüge: Kurze Wege zum Verbraucher reduzieren die Übertragungsverluste erheblich, die Abwärme kann für Heiz- und Warmwasserzwecke – inklusive der gewerblichen Nutzung – sinnvoll herangezogen werden. Als Fazit ist einerseits eine deutlich höhere Energieeffizienz zu verzeichnen, andererseits wird sogar eine verbesserte Ausfallsicherheit erzielt: Durch Fernsteuerung arbeiten zahlreiche dezentrale Anlagen kleinerer oder mittlerer Leistung im Verbund wie ein *virtuelles Großkraftwerk* – nur führt der Ausfall einer oder mehrerer dieser Kleinanlagen nicht mehr zum Komplettausfall der gesamten Leistung! Dass es sich dabei keineswegs um eine Utopie handelt, belegt ein Blick über die Grenze nach Dänemark: Rund 50 % der Elektrizität und 80 % der Fernwärme werden dort bereits heute durch Blockheizkraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung bereitgestellt.

Der weite Weg zur Steckdose

Solange eine autonome Versorgung mit Windrotor, Solaranlage und Brennstoffzellen-Heizkessel oder Biogasanlage noch nicht realisiert ist, muss die elektrische Energie vom Kraftwerk zum Hausan-

1) Mehr als Sonne, Wind und Wasser – Energie für eine neue Ära, Ch. Synwoldt, Wiley-VCH, 2008.

schluss und von dort weiter zu den einzelnen Steckdosen gelangen – ein weiter Weg.

Da jedes elektrisch leitfähige Material – alleinige Ausnahme: Supraleiter – dem elektrischen Strom einen mehr oder weniger großen Widerstand entgegensetzt, ist es nicht zweckmäßig und auch technisch kaum realisierbar, eine direkte Verbindung zwischen Kraftwerk und Haushalten herzustellen. Die Höhe des zu übertragenden elektrischen Stroms ist, wie noch gezeigt wird, prohibitiv.

Bereits mit einem einfachen Experiment ist dies nachvollziehbar: Man fühle den Mantel einer elektrischen Zuleitung von einem Wäschetrockner oder einem anderen Großverbraucher wie Waschmaschine, Staubsauger etc. an, nachdem das Gerät für einige Zeit eingeschaltet und in Betrieb ist. Die Leitung wird sich in der Regel (hand)warm anfühlen, ein Indiz für die durch den elektrischen Strom im Kabel verursachte Wärme. Ist der Kupferquerschnitt der Adern zu niedrig gewählt, kann die Erwärmung auch deutlicher spürbar sein; hier ist dringend Abhilfe geboten! Ganz in Analogie zum Wasserrohr gilt auch hier: je größer der Querschnitt, desto geringer der Widerstand für den elektrischen Strom. Im Umkehrschluss machen also höhere Ströme einen größeren Leiterquerschnitt erforderlich. Eine Vertiefung der Themen Widerstand und Supraleitung findet sich im Glossar ab Seite 242.

Die wichtigsten Werkstoffe für elektrische Leiter sind Kupfer und Aluminium – Ersteres für Kabel, Letzteres für Freileitungen und Kabel. Die elektrische Leitfähigkeit von Aluminium ist 35 % geringer als die von Kupfer. Dennoch verfügt Aluminium über einen entscheidenden Vorteil: Es ist – selbst unter Berücksichtigung der geringeren Leitfähigkeit – bedeutend leichter und auch kostengünstiger als Kupfer.

Doch zurück zur Anbindung der Elektrizitätsverbraucher an das Kraftwerk. Das folgende Gedankenexperiment soll die Problematik beim Transport der elektrischen Energie vom Kraftwerk zu den Haushalten verdeutlichen: Die Leistung eines Großkraftwerks würde – bezogen auf die Spannung am Haushaltsanschluss von 230 V bzw. 400 V (Volt) – einen elektrischen Strom mit der enormen Stärke von ca. 2,5 Mio. A (Ampere) bedingen. Dafür wäre ein Kupferquerschnitt von mehr als 2 m^2 erforderlich! Derartige Kabel wären nicht nur ausgesprochen unhandlich und enorm schwer – der laufende Meter hätte eine Masse von 18 t, allein die Menge an Kupfer würde zu einem

Kostenbeitrag in der Größenordnung von 100.000 € pro Meter führen. Weiterhin ist zu bedenken, dass die weltweiten Kupfervorkommen einem derartigen Vorhaben enge Grenzen auferlegen würden. Auch für die Alternative, Aluminium, sieht es nicht wesentlich anders aus: Da Aluminium einen höheren Widerstand besitzt, muss der Querschnitt entsprechend größer gewählt werden, im oben genannten Beispiel würde der Aluminiumquerschnitt mehr als 3 m^2 betragen. Der laufende Meter hätte eine Masse von mehr als 8 t. Auf Grund von hier nicht weiter vertieften Zusammenhängen (u. a. Skineffekt, Wärmeableitung) ist zudem die technische Realisierung von Leitern für derart hohe Ströme weitaus komplexer und würde noch sehr viel höhere Leiterquerschnitte erforderlich machen.

Folglich bedient man sich eines Tricks: Die Grundlage liefert dafür die Beschreibung der zu übertragenden elektrischen Leistung als das mathematische Produkt aus Spannung und Stromstärke; der in Wechselstromnetzen ebenfalls zu berücksichtigende Leistungsfaktor cos φ soll an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden – mehr Details zu diesem Thema im Glossar ab Seite 236. Für die Übertragung über größere Distanzen wird ein möglichst hohes Spannungsniveau gewählt (bis zu 400.000 V = 400 kV), damit die Stromstärke durch die Freileitungen und Kabelverbindungen deutlich geringer ausfällt und die Leiterquerschnitte entsprechen niedriger gewählt werden können. Die Obergrenze für die Spannung wird lediglich durch den Aufwand zur Beherrschung sehr hoher Spannungen begrenzt. Dennoch erwärmen sich Freileitungen bei maximal zulässiger Stromstärke auf bis zu 85 °C. Dies erklärt, weshalb die Verlustleistung in den Übertragungsnetzen für das Hoch- und Abspannen, vor allem aber den Übertragungsweg, sich auf 10–15 % der Kraftwerksleistung addiert.

Für das Umspannen – das kraftwerksseitige Erzeugen einer Hochspannung wie auch das verbraucherseitige Bereitstellen einer Niederspannung – werden Transformatoren eingesetzt. Dies bedingt einen Betrieb der Versorgungsnetze mit Wechselspannung: Transformatoren können keine Gleichströme übertragen! Letztere stellen sogar eine Gefahr für den Betrieb von Transformatoren dar, da sie zu hoher Erwärmung führen. Dieser Effekt ist bei ausgedehnten Ost-West-Verbindungen beispielsweise in Nordamerika oder der Russischen Föderation zu berücksichtigen; durch das Erdmagnetfeld werden in den

mehrere 1.000 km langen Leitungen durchaus beachtliche Gleichströme induziert.

Ende des 19. Jahrhunderts waren erste elektrische Netze mit Gleichspannung betrieben worden. Die zunächst nur für eine elektrische Beleuchtung ausgelegten Infrastrukturen (Generatoren, Übertragungsleitungen) stießen jedoch rasch an technische Grenzen, so dass das oben beschriebene Prinzip der Wechselspannung sich durchsetzte. Dennoch gibt es auch in neuerer Zeit Einsatzszenarien, die sich vorteilhaft mit Gleichspannung realisieren lassen: Bei der Übertragung über sehr weite Entfernungen treten in Wechselspannungssystemen neben der Erwärmung der Leitungen noch weitere Verluste auf. Hier kann durch moderne Halbleitertechnik eine Umformung der Wechselspannung in Gleichspannung – und umgekehrt am anderen Ende der Verbindung – die technisch und kommerziell attraktivere Lösung sein. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen (HGÜ) spielen bei Transkontinentalverbindungen ebenso eine Rolle wie bei Überlegungen zur regenerativen Energieversorgung Mitteleuropas durch Windkraftwerke an der nordafrikanischen Atlantikküste oder Solaranlagen in der Sahara[2)].

Doch wie gelangt der elektrische Strom nun zum Verbraucher? Nur in Ausnahmefällen wie industriellen Großanlagen wird es eine direkte Anbindung an das Kraftwerk geben! Der Optimierungskonflikt aus ökonomischem Betrieb und zuverlässiger Versorgung wird mit mehr oder weniger eng vermaschten Netzstrukturen beantwortet. So existieren auf höchster Spannungsebene nationale und internationale Verbundnetze und auf regionaler und lokaler Ebene Mittel- und Niederspannungsnetze für die Verteilung der Elektrizität.

Dabei ist die im Sprachgebrauch eingebürgerte Bezeichnung *Netz* durchaus auch auf die Struktur der Verbindungen zu beziehen. Durch den maschenförmigen Aufbau von Versorgungsnetzen wird ein hohes Maß an Ausfallsicherheit gewährleistet. Störungen wirken sich im Normalfall nur lokal aus und beeinträchtigen nicht die flächendeckende Versorgung. Erst wenn einzelne Übertragungswege oder Verbindungsknoten an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen, wirken sich Störungen im größeren Rahmen aus. Letzteres war in der jüngeren Vergangenheit durchaus der Fall, da die Auslegung der Netze (Versorgungssicherheit) und die in den letzten Jahren verstärkt

2) Mehr als Sonne, Wind und Wasser – Energie für eine neue Ära, Ch. Synwoldt, Wiley-VCH, 2008.

durchgeführte Art der Nutzung (Durchleitung überregionaler und teils internationaler Kraftwerkskapazität) nur bedingt miteinander zu vereinbaren sind. Im November 2006 waren Teile von Deutschland, Frankreich, Belgien, Italien, Österreich und Spanien bis zu zwei Stunden von der Stromversorgung abgetrennt. Die Ursache lag nach Angaben der UCTE (*Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity*, Betreiber des europäischen Verbundnetzes) in einer unzureichend geplanten Abschaltung einer Hochspannungsleitung in Norddeutschland. Andere Kraftwerks- und Netzbetreiber waren über die Maßnahme nicht informiert, so dass es zu einer Überlastung weiterer Leitungskapazitäten kam. In der Folge mussten rund 10 Millionen Haushalte von der Energieversorgung getrennt werden.

Besonders gefährlich erweisen sich in einem solchen Zusammenhang Kernkraftwerke. Denn auch im Falle einer Abschaltung und Trennung vom Netz müssen dort über lange Zeiträume die Kühl- und Steuereinrichtungen zuverlässig arbeiten. Die hierfür benötigte elektrische Energie wird in der Regel durch hausinterne Diesel-Notstromaggregate gesichert. Wenn – wie beispielsweise im Sommer 2006 in der schwedischen Anlage Forsmark – die Notstromversorgung zeitweise oder sogar vollständig ausfällt, droht höchste Gefahr bis hin zu einer Kernschmelze – wie 1979 in der Anlage Three Mile Island bei Harrisburg (USA), wo es zu einer teilweisen Kernschmelze kam – oder einer Reaktorexplosion – wie bei dem Unglück in Tschernobyl (Ukraine) im Jahre 1986.

Wie weit eine maschenförmige Netzstruktur zur Versorgungssicherheit beiträgt, zeigt die folgende Abbildung. Erst bei einer über die Auslegung hinausgehenden Nutzung kann eine zuverlässige Versorgung nicht mehr sichergestellt werden. Konsequent wäre in diesem Fall ein der veränderten Nutzung angepasster Ausbau der Netzinfrastrukturen.

In den Knotenpunkten der Netze befinden sich Schaltanlagen, die ein Abschalten von Leitungen oder Transformatoren zur Verbindung mit anderen Netzebenen erlauben. Auf diese Weise ist eine gefahrlose Wartung sämtlicher Anlagen möglich. Bei Betriebsstörungen oder Überlast können Verbindungen auch unter Volllast getrennt werden, um weitere Schäden zu vermeiden. Dieses Modell setzt sich vom transkontinentalen Übertragungsnetz auf der Ebene von 230 und 400 kV über Hochspannungsnetze (110 kV), Mittelspannungs-

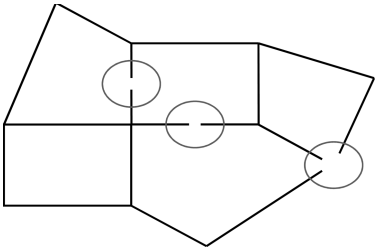

Bild 1 Ausfallsicherheit durch Maschenstruktur. Selbst bei Störungen in mehreren Zweigen und/oder Knoten eines Netzes bleibt die flächendeckende Versorgung gewährleistet; alle Knoten sind – wenn auch auf Umwegen – weiterhin miteinander verbunden.

(10–60 kV) und Niederspannungsnetze (230–1.000 V) zur Verteilung der elektrischen Energie bis hin zu den Haushalten fort.

Im Kleinen dient der häusliche Sicherungskasten als Schaltanlage: Leitungsschutzschalter und Schmelzsicherungen dienen zur sicheren Trennung der einzelnen Stromkreise im Haushalt – beispielsweise bei Malerarbeiten oder dem Anschluss neuer Steckdosen und Lichtschalter. Bei Überlastung eines Stromkreises lösen die Sicherungen automatisch aus und trennen den Stromkreis. Schmelzsicherungen müssen nach dem Auslösen ersetzt werden, bei Leitungsschutzschaltern reicht ein Zurücksetzen des Stellhebels – in beiden Fällen natürlich erst *nach* Beheben der Fehlerursache.

Eine weitere Form der Sicherung ist der Fehlerstromschalter (FI-Schalter). Er löst aus, wenn ein Fehlerstrom fließt. Ursache für einen

Bild 2 145 kV gasisolierte Schaltanlage (gekapselte Anlage); (Quelle: Siemens AG).

Bild 3 110 kV Freiluft-Schaltanlage und Umspannwerk (Quelle: Thomas Schichel).

Fehlerstrom kann beispielsweise eine defekte Isolierung, ein feuchtigkeitsbedingter Kriechstrompfad – oder auch der sprichwörtliche und niemals nachzuvollziehende Föhn in der Badewanne – sein. Für Anschüsse in Badezimmern oder anderen Feuchträumen ist ein Fehlerstromschutz vorgeschrieben, ebenso für alle Anschlüsse im Freien. Gemäß VDE-Normen ist seit 2007 auch eine entsprechende Absicherung aller anderen Haushaltsstromkreise erforderlich. Das Abschalten erfolgt bei einer Stromstärke von maximal 30 mA, um einen sicheren Schutz für Personen zu gewährleisten.

Die folgenden Abbildungen zeigen gängige Sicherungen aus Haushaltsverteilerkästen sowie deren Schaltplansymbole.

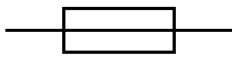

Bild 4 Einsatz für Schmelzsicherung.

Bild 5 Leitungsschutzschalter (Quelle: Hager).

Bild 6 Fehlerstromschalter (Quelle: Hager).

Spannung ist gefährlich, Strom verrichtet Arbeit

Unter welchen Bedingungen fließt nun aber ein Strom – und wo liegt Spannung an? Anders ausgedrückt: Was ist die Ursache, was ist die Wirkung? Die umgangssprachliche Verwendung der Begriffe Strom und Spannung führt in der Regel eher zu einem Mehr an Verwirrung, dabei ist für ein grundlegendes Verständnis keinesfalls der Griff zum Physikbuch erforderlich.

In der Analogie des Wasserstrommodells entspricht die elektrische Spannung der Fallhöhe eines Wasserfalls oder dem Niveauunterschied längs des Flusslaufs. Die Spannung ist die Ursache für den Stromfluss, die Spannung *treibt* einen Strom durch den elektrischen Leiter. An den Kontakten einer Steckdose liegt also eine *Spannung* an. Erst durch einen Verbraucher wie eine Lampe oder einen Ventilator kommt ein Stromkreis zu Stande, der durch das Schließen des Schalters am Gerät geschlossen wird. Nun fließt ein elektrischer Strom, der eine elektrische Leistung umsetzt: In der Glühlampe wird der Glühfaden aufgeheizt und zum Aussenden einer Wärmestrahlung veranlasst, im Ventilator wird ein Elektromotor angetrieben. Solange ein Strom fließt, wird im physikalischen Sinne Arbeit verrichtet.

Die Spannung an den Klemmen der Steckdose ist – nahezu – konstant. Das heißt, dass allein über den elektrischen Widerstand des Verbrauchers die Höhe des elektrischen Stroms bestimmt wird; so ist der Strom durch eine 100 W Glühlampe genau das 5-fache dessen, was an Strom durch eine 20 W Lampe fließt. Ähnlich verhält es sich mit der Dimensionierung von Heizkörpern (Wasserkocher, Kaffeemaschine, Bügeleisen) und Motoren (Ventilator, Staubsauger, Bohrmaschine). Der Auslegung von Elektrogeräten für den Betrieb mit einer bestimmten Spannung ist noch auf eine weitere Art Rechnung zu tragen: Ein Betrieb europäischer Geräte in den USA (Netzspannung: 110–120 V) würde den Stromfluss halbieren, also nur ein Viertel der Nennleistung umsetzen.

Regelrecht gefährlich wäre hingegen der umgekehrte Fall, der Betrieb eines US-amerikanischen Elektrogeräts an europäischen Steckdosen. Ein Betrieb mit der doppelten Nennspannung dürfte in vielen Fällen nicht nur aus Sicherheitsgründen bedenklich sein, sondern häufig auch zur Zerstörung des Geräts führen. Das Vierfache der konstruktiv vorgesehenen Leistung und den daraus abgeleiteten Größen – also zum Beispiel Erwärmung, Drehmoment – überleben we-

der Glühlampen noch Heizwicklungen oder Motoren. Auch wenn in vielen Fällen Urlauber und Geschäftsreisende zu Recht über die zahlreichen Varianten von Steckern und Steckdosen verärgert sind, an dieser Stelle tragen die unterschiedlichen mechanischen Abmessungen auch zu einem besseren Schutz vor elektrischen Pannen bei – und nicht zu vergessen: der eigenen Gesundheit! Vor dem Einsatz universeller Steckeradapter sei also insbesondere bedacht, ob die Geräte auch an der fremden Spannung betrieben werden können: Elektrorasierer sind häufig umschaltbar, Netzteile für Laptop-Computer sogar meist Alleskönner, die an praktisch jeder Steckdose weltweit angestöpselt werden dürfen. Aber bereits der Haarföhn verlangt zwingend nach seiner Nennspannung. Diverse Abbildungen und weitere Details zu den verschiedenen Steckernormen finden sich im Abschnitt *Special: Stecker* ab Seite 202.

Noch gravierender wird der Unterschied, wenn Niedervoltglühlampen, wie sie beispielsweise in PKWs zum Einsatz kommen, direkt an eine Haushaltssteckdose angeschlossen werden. Die Nennspannung im PKW-Netz beträgt 12 V, bei LKWs sind es 24 V. Damit werden PKW-Glühlampen beim Betrieb im LKW unmittelbar zerstört. Die 4-fache Leistung führt zur sofortigen Überhitzung des Glühfadens. Die noch einmal um den Faktor 10 höhere Spannung an der Haushaltssteckdose würde eine Leistung entsprechend der 400-fachen Nennleistung umsetzen – es leuchtet ein, dass keine Glühlampe eine solche Tortur auch nur für Sekundenbruchteile überstehen kann. Hier ist insbesondere bei Halogenlampen zwischen Niedervolt-

Bild 7 Halogenglühlampen für 230 V; Sockeltypen von links nach rechts: G9, GU10, R7s; (Quelle: OSRAM).

Bild 8 Halogenglühlampen für 12 V; Sockeltypen von links nach rechts: G4; GU5,3; GY6,35; GZ6,35; (Quelle: OSRAM).

und Hochvolt-Typen zu unterscheiden. Die verschiedenen Sockel- und Kontaktformen helfen, die richtige Wahl zu treffen und folgenschwere Verwechslungen zu vermeiden. Die dabei in den Typenbezeichnungen enthaltenen Ziffern geben typischerweise Geometriedaten wie den Kontaktabstand oder Sockeldurchmesser in Millimetern an.

Und es lässt sich noch ein zweiter Gedanke ableiten. Wenn die Spannung die Ursache für den Stromfluss ist, dann muss auch die elektrische Isolierung abhängig von der Betriebsspannung sein. Denn je höher die Spannung ist, desto eher können sich parasitäre Strompfade bilden, die zu technischem Versagen, vor allem aber auch zu Schäden an Leib und Leben führen können. Sind Kleinspannungen wie bei Taschenlampenbatterien, Autobatterien oder Telefonen selbst unter widrigen Umständen unbedenklich, so ist bei der im

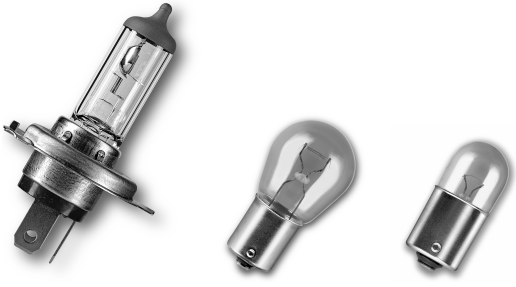

Bild 9 Kfz-Glühlampen (12 V); Typen von links nach rechts: H4 (Abblendlicht, 60/55 W); BA15s (Bremsleuchten, 21 W); BA15s (Begrenzungsleuchten, 5 W); (Quelle: OSRAM).

Haushalt üblichen Spannung von 230 V für einen hinreichenden Berührschutz zu sorgen. Werden entsprechende Geräte in feuchten Räumen betrieben oder ist ein Betrieb im Freien vorgesehen, muss auch das Eindringen von Feuchtigkeit wirksam unterbunden werden. Ein Feuchtigkeitsfilm – insbesondere mit Salz- oder Seifenresten – kann auch *auf* der Isolierung zu gefährlichen Spannungen führen. Ohne Fehlerstromschutzschalter droht hier höchste Gefahr!

Wie viele Geräte an einer Steckdose?

Die Sicherungen im Haushalt erfüllen die Funktion eines Leitungsschutzschalters: Damit die in den Wänden und Decken verlegten Kupferkabel nicht zu heiß werden – und gegebenenfalls Brände auslösen können – wird je nach Kabelquerschnitt für 1,0 mm² Kupferadern eine 10-A- bzw. für 1,5 mm² Kupferadern eine 16 A Sicherung verwendet. In Summe können also an jedem Stromkreis elektrische Geräte mit einer Gesamtleistung von maximal 2.300 W bzw. 3.680 W gleichzeitig betrieben werden. Dies gilt auch dann, wenn mehrere Steckdosen und Deckenanschlusspunkte für Leuchten an einem Strang angeschlossen sind!

Werden an einem Stromkreis mehrere Verbraucher betrieben (z. B. Kaffeemaschine, Toaster und Wasserkocher), so kann die zulässige Last dabei durchaus überschritten werden – die Sicherung trennt die Leitung vom Netz, alle Geräte bleiben kalt. Abhilfe schafft das zeitversetzte Betreiben: Erst den Wasserkocher – der Tee muss sowieso einige Minuten ziehen – danach können Kaffeemaschine und Toaster für das Frühstück um die Wette eifern. Optimal wäre hingegen eine separate Absicherung einzelner Steckdosenstromkreise, wie es für die Großverbraucher Geschirrspüler, Waschmaschine und Wäschetrockner längst üblich ist.

Auch Vielfachsteckdosen bergen die Gefahr, mehr Geräte anzuschließen, als gleichzeitig betrieben werden dürfen. Drei, sechs oder zwölf Anschlüsse sollten nicht dazu verleiten, eine entsprechende Anzahl an Geräten mit hohem Strombedarf hier anzuschließen – vor allem jedoch nicht, diese auch gleichzeitig zu betreiben. Dies gilt umso mehr, wenn das Zuleitungskabel zur Steckdose verdächtig dünn wirkt und gar mehr als handwarm wird.

Glühlampe, Föhn und Staubsauger

Gerade weil wir sie ständig handhaben, macht sich kaum jemand darüber Gedanken: Wie funktionieren eigentlich die täglich genutzten Geräte im Haushalt? Wie wird aus elektrischem Strom Licht, Wärme und Bewegung?

Das Phänomen der Erwärmung von Strom durchflossenen elektrischen Leitern wurde bereits weiter oben erwähnt. Es lässt sich an-

schaulich durch die Reibung im Draht beschreiben, die der elektrische Strom überwinden muss. Genauer: Die Elektronen treffen auf ihrem Weg durch das Kristallgitter immer wieder gegen Atome und regen damit das Gitter zu einem thermischen Schwingen, der Brown'schen Molekularbewegung, an. Dass der Elektronenfluss dennoch nicht zum Stillstand kommt, hängt mit der Spannung – z. B. zwischen den Klemmen der Steckdose – zusammen. Durch die Spannung herrscht im Draht ein elektrisches Feld, das auf die beweglichen Elektronen kontinuierlich eine Kraft ausübt und überhaupt erst die Ursache für den Stromfluss ist. Mit zunehmender Stromstärke und abnehmendem Leiterquerschnitt werden die Berührungen zwischen Elektronen und Kristallgitter wahrscheinlicher; die Folge, der Draht wird heißer und heißer. Bei vorgegebener Spannung wird der Strom nur durch den elektrischen Widerstand des Drahtes begrenzt.

Genau dieser Effekt wird nicht nur in Heizelementen für Toaster, Wasserkocher und Elektroherde genutzt, sondern findet auch in konventionellen Glühlampen Anwendung. Ein auch bei hohen Temperaturen beständiger Draht – die Glühwendel besteht meist aus Wolfram – wird auf Fadentemperaturen von bis zu 2.900 °C aufgeheizt. Glühlampen gehören somit zur Gruppe der Temperaturstrahler. Um bei derart hohen Betriebstemperaturen ein sofortiges Verbrennen zu vermeiden, darf der Glühfaden nicht mit Luftsauerstoff in Kontakt kommen. Aus diesem Grund ist er von einem Glaskolben umgeben, der entweder evakuiert ist oder eine Gasfüllung – Edelgase oder Halogene – enthält. Letzteres verringert eine Ablagerung von abgedampften Metallpartikeln an der Innenseite des Glaskolbens. Zum Ende der Lebensdauer einer Glühlampe ist dieses Phänomen deutlich zu beobachten: Der Glaskolben wirkt in einigen Bereichen grau. Dabei handelt es sich um nichts Anderes als Teile des immer dünner werdenden Glühfadens, die verdampft sind und sich an der Innenseite des Glaskolbens abgesetzt haben.

Das größte Manko der Glühlampe als Leuchtmittel ist die mit maximal 5 % recht bescheiden ausfallende Lichtausbeute – die übrigen 95 % sind Abwärme, für das menschliche Auge unsichtbare Strahlung im infraroten Bereich. Nur eine noch höhere Temperatur der Glühwendel kann den Wirkungsgrad erhöhen – dieses Prinzip wird in Halogenlampen verfolgt.

Jetzt wird noch deutlicher, aus welchem Grund eine Glühlampe oder ein Gerät, das für den Einsatz bei 120 V z. B. in den USA ausge-

Bild 10 Glühlampen für 230 V; von links nach rechts: E27, E27 (Typ R63), E14; (Quelle: OSRAM).

legt ist, nicht an einem 230 V Anschluss in Europa betrieben werden darf: Das elektrische Feld ist nahezu doppelt groß. Da der Widerstand für den elektrischen Strom herstellungsbedingt jedoch einen festen Wert hat, würde beim Anschluss in Europa ein gegenüber der Auslegung beinahe doppelt so hoher Strom fließen. Als Resultat würde die in Form von Wärme umgesetzte Leistung um den Faktor vier höher liegen – mit fatalen Konsequenzen für die Temperatur der Heizwendel. Bezogen auf eine Glühlampe reduziert bereits eine 10 %ige Erhöhung der Spannung die Betriebsdauer um ca. 80 %. Hingegen führt eine 10 %ige Reduzierung der Betriebsspannung zu einer um mehr als den Faktor vier erhöhten Lebenserwartung.

Leuchtmittel wie beispielsweise Energiesparlampen oder Leuchtdioden arbeiten nach vollkommen anderen Verfahren, bei denen weit weniger Wärme freigesetzt wird. Im ersteren Fall handelt es sich um eine Gasentladung[3)], bei der zunächst UV-Strahlung entsteht, die dann mittels Leuchtstoffen in sichtbares Licht umgewandelt wird (Leuchtstofflampen) – derselbe Effekt, wie er auch in Kathodenstrahlröhren von Farbfernsehern und Monitoren angewendet wird.

Bei Leuchtdioden wird durch Elektrolumineszenz Licht erzeugt. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes treffen Ladungsträger in einem Halbleitermaterial aufeinander und werden dabei auf ein höheres Energieniveau angehoben. Beim Zurückfallen in den Grundzu-

3) Durch Anlegen eines starken elektrischen Feldes wird ein Gas elektrisch leitfähig gemacht (Stoßionisation). Durch die dabei auftretende Anregung von Elektronen wird Strahlung einer bestimmten Wellenlänge freigesetzt. – Dabei muss es sich nicht zwangsläufig um Strahlung im sichtbaren Bereich (Licht) handeln. Blitze während eines Gewitters sind ebenfalls Gasentladungen.

stand wird die Energie in Licht umgewandelt. Prinzipbedingt kann es sich dabei nur um einen jeweils engen Wellenlängenbereich handeln, so dass Leuchtdioden farbiges Licht – rot, gelb, grün, blau – oder auch infrarote Strahlung abgeben. Durch das Zusammensetzen aus mehreren Einzelkomponenten lässt sich schließlich auch weißes Licht bereitstellen, genau wie bei Entladungslampen eine Kombination verschiedener Leuchtstoffe benötigt wird.

Fleischtheke oder Eissalon?

Über die Anzahl und Kombination der Leuchtstoffe lässt sich in weiten Bereichen die Lichtfarbe einstellen, selbst weiß ist nicht gleich weiß: Neutralweiß, Warmweiß oder Tageslicht stehen als genormte Kategorien zur Auswahl.

Der Farbton Warmweiß ist dem Licht von Glühlampen soweit möglich angenähert, gegenüber Neutralweiß tendenziell mit einem Stich ins Rötliche. Mit Tageslicht existiert eine eher kühlere, leicht ins Bläuliche neigende Farbvariante, die der Lichtfarbe der Sonne ähnelt. Der bläuliche Ton lässt den Eissalon auch ohne Klimaanlage als angenehm kühle Umgebung bei hochsommerlichen Temperaturen erscheinen – zumindest für das Unterbewusstsein. Anders verhält es sich bei Fleisch- und Obsttheken: Damit das Schnitzel und die Äpfel noch frischer erscheinen, wird hier zuweilen mit Leuchtstofflampen gearbeitet, die den roten Spektralbereich hervorheben, auch wenn dies nicht statthaft ist.

Generell ist die Farbwiedergabe eng mit den zum Einsatz kommenden Leuchtstoffen verknüpft. Dies wird weniger durch den visuellen Eindruck der Lichtfarbe als vielmehr durch davon angestrahlte, farbige Objekte deutlich. Das T-Shirt, das auf der Straße ganz anders wirkt als im Geschäft, hat dies sicher den Meisten schon einmal buchstäblich vor Augen geführt – auch wenn die Ursache bis eben unbekannt war.

Sowohl Energiesparlampen als auch Leuchtdioden verfügen über einen deutlich höheren Wirkungsgrad als Glühlampen. Dabei liegen moderne Leuchtdioden inzwischen auf dem gleichen Niveau wie Leuchtstofflampen: Beide Technologien sind damit in der Lage, mit derselben elektrischen Leistung 4–6-mal soviel Licht zu erzeugen wie eine herkömmliche Glühlampe. Auch Halogenlampen reichen mit einem gegenüber der Glühlampe um den Faktor 1,5–2 höheren Wirkungsgrad nicht an dieses Niveau heran. Prinzipbedingt benötigen Leuchtstofflampen ein Vorschaltgerät (*Starter*), um die Gasentladung in Gang zu setzen. Bei Kompaktleuchtstofflampen (*Energiesparlampen*) ist dieses in den Schraubsockel integriert. Halogenlampen werden zwischen Hochvolt- und Niedervolt-Typen unterschieden: Erstere können unmittelbar an die Stromversorgung im

Bild 11 Halogenlampen; Niedervolt (links), Hochvolt (rechts); (Quelle: OSRAM).

Haushalt angeschlossen werden. Die Zweiten benötigen einen Transformator oder ein Netzteil, um die 230 V vom Lampenanschluss auf 12 V herabzusetzen. – Wie weiter unten ausgeführt wird, ist trotz des erhöhten Aufwands die damit verbundene Investition dennoch lohnend.

Daneben spielt zudem die Betriebsdauer eine wichtige Rolle. Leuchtstofflampen – zu denen auch die Energiesparlampen zählen – können für ca. 10.000 Stunden genutzt werden; das entspricht der 10-fachen Nutzungsdauer einer Glühlampe. Zum Vergleich: Ein Jahr Dauerbetrieb entspricht 8.760 Stunden; eine Nutzungsdauer von 10.000 Stunden kommt einem Betriebszeitraum von 10 Jahren im Haushalt gleich. Ähnlich wie für Glühlampen ist der Einschaltmoment auch bei Leuchtstofflampen mit einer starken Materialbeanspruchung verbunden. Neuere Typen profitieren hier deutlich von der technischen Weiterentwicklung, bei älteren Leuchtstofflampen ist es hingegen zweckmäßig, sie gegebenenfalls über längere Zeiträume eingeschaltet zu lassen, anstelle sie im Minutenrhythmus der tatsächlichen Notwendigkeit zu schalten. Ein entsprechendes Negativbeispiel wäre der Betrieb über Kurzzeitschalter in Treppenhäusern. Bei Glühlampen kann der im Einschaltmoment sehr hohe Strom durch den Einsatz eines Dimmers wirkungsvoll reduziert werden. Damit erhöht sich die Lebensdauer der Glühlampe deutlich und es besteht zudem die Möglichkeit, je nach Bedarf durch Herabsetzen der Helligkeit elektrische Energie zu sparen.

Der im Vergleich zur Glühlampe höhere Preis für eine Leuchtstofflampe amortisiert sich bereits über die vielfach längere Nut-

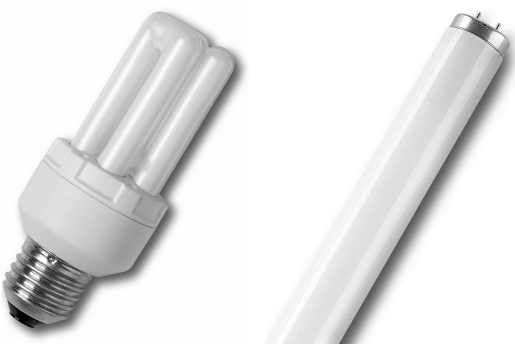

Bild 12 Leuchtstofflampen; Kompaktleuchtstofflampe (links), Langfeld-Leuchtstofflampe (rechts); (Quelle: OSRAM).

zungsdauer – nicht mit eingerechnet die Reduzierung des Elektrizitätsbedarfs um ca. 80 %. Das summiert sich über die 10-jährige Lebensdauer einer 20 W Energiesparlampe (gleiche Lichtausbeute wie eine 100 W Glühlampe) auf 800 kWh; bei aktuellen Elektrizitätskosten von ca. 0,20 Euro/kWh resultiert daraus eine zusätzliche Ersparnis in Höhe von 160 Euro. Beim Einsatz einer Halogenlampe mit vergleichbarer Leistung (70 W) verringert sich die Elektrizitätsrechnung im Vergleichszeitraum immerhin noch um 60 Euro.

Leuchtdioden erreichen mit mehr als 100.000 Stunden sogar eine noch wesentlich längere Betriebsdauer. Auch dann fallen sie in der Regel nicht abrupt aus, lediglich die Lichtausbeute lässt fortlaufend nach. Sie sind unempfindlich gegenüber Erschütterungen oder häufigem Ein- und Ausschalten. Lediglich auf starke Erwärmung, wie sie beispielsweise aus einem Betrieb mit Überspannung – und infolge

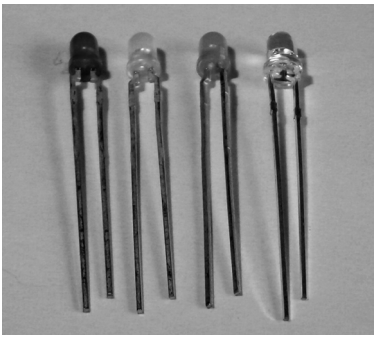

Bild 13 Leuchtdioden (Quelle: Thomas Schichel).

dessen zu hohen Strömen im Halbleiter – resultiert, reagieren Leuchtdioden empfindlich. Dies kann die Lebensdauer stark reduzieren oder gar frühzeitig beenden.

Glühlampe defekt durch Kurzschluss?

Mit größter Wahrscheinlichkeit ist das »Durchbrennen« einer Glühlampe im Einschaltmoment zu beobachten. Der niedrige Widerstand der kalten Glühwendel lässt einen wesentlichen höheren Strom zu als im normalen Betrieb. Dadurch erreicht der Glühdraht sehr schnell seine Betriebstemperatur. Andererseits kann diese enorme Belastung dazu führen, dass der in des Wortes Sinne haarfeine Glühdraht reißt – insbesondere wenn nach längerer Betriebsdauer Teile des Drahtes bereits verdampft sind und sich an der Innenseite des Glaskolbens als silber-grauer Niederschlag abgesetzt haben.

Häufig ist in diesem Moment auch ein Ansprechen der Sicherung für den entsprechenden Stromkreis zu beobachten. Dies legt die Vermutung nahe, ein Kurzschluss habe den Defekt in der Glühlampe ausgelöst.

In der Realität verhält es sich jedoch genau anders herum: Beim Reißen der Glühwendel kann es zu einem elektrischen Lichtbogen innerhalb der Glühlampe kommen. Die Stromstärke steigt dabei kurzfristig stark an, was zum Auslösen der Sicherung führt. – Ursache für den Kurzschluss ist also der Defekt in der Glühlampe.

Doch Licht und Wärme sind nur einige Möglichkeiten von vielen, elektrische Energie zu nutzen. Das Umsetzen in eine Bewegung, in mechanische Energie, ist von genauso großer Bedeutung im Alltag: Motoren, Antriebe, Pumpen und Gebläse sind sowohl in der Industrie als auch in privaten Haushalten allgegenwärtig.

Ein Blick in die Vergangenheit führt zu aufschlussreichen Einsichten: In den Fabriken des 19. Jahrhunderts lieferten Dampfmaschinen die benötigte Antriebsenergie. Diese wurde über Transmissionsriemen – Leder- und Textilbänder – zu den einzelnen Maschinen übertragen. Ein unfallträchtiges und nur bedingt zuverlässiges Konzept, das für den Einsatz im Haushalt keineswegs geeignet erschien und auch für handwerkliche Tätigkeiten nicht nutzbar war. Über lange Zeiträume war hier ausschließlich die Muskelkraft verfügbar. Ob Säge, Bohrer, Schleifstein oder Nähmaschine: Allein Hand- und Fußkurbeln lieferten die zum Antrieb notwendige Energie. Gleiches galt für das Weben von Tüchern, das Dreschen von Getreide oder das Drucken von Büchern und Zeitschriften. Der Leistungsfähigkeit derart betriebener Geräte sind enge Grenzen gesetzt, mehr als Kraft und Ausdauer der Bediener es zulassen, können sie nicht leisten.

Die Energie für Licht und Wärme wurde – soweit vorhanden – über städtische Gasnetze bezogen, andernorts dienten Petroleumleuchten und Kerzen bzw. Holz- und Kohleöfen als Licht- und Wärmespender.

Bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts war mit der *Volta'schen Säule* die elektrische Batterie – und damit ein Lieferant für elektrische Energie – bekannt. Für den Betrieb von Antrieben und Leuchten waren diese Batterien jedoch zu leistungsschwach, so dass erst die allgemeine Versorgung mit elektrischer Energie am Anfang des 20. Jahrhunderts die Basis für den weit verbreiteten Einsatz von Elektromotoren und elektrischem Licht bot. Ein durchaus gegenwärtiger Konflikt, denn erst der Auf- und Ausbau spezifischer Infrastrukturen erlaubt die Verbreitung der jeweiligen Technologien. Vor dem massenhaften Einsatz müssen die entsprechenden Vorraussetzungen erfüllt sein. Dem stehen jedoch häufig wirtschaftliche Erwägungen entgegen, wird doch zunächst eine gewisse Nachfrage erwartet – die ohne die betreffenden Infrastrukturen allerdings nicht zu Stande kommen kann. Ein Beispiel: In Deutschland können bislang nur wenige Fahrzeuge mit Erdgas betrieben werden. Das Tankstellennetz für Erdgas ist in Deutschland weithin lückenhaft, obwohl sich durch den Einsatz dieses Kraftstoffs eine deutliche Abgasreduktion erzielen lässt. Ganz anders in Italien oder den Niederlanden: hier existieren flächendeckende Versorgungsnetze. So verwundert es nur wenig, wenn 80 % aller in Europa betriebenen Erdgas-Fahrzeuge in Italien zugelassen sind.[4] Letztlich handelt es sich bei dieser Situation um eine Abwandlung des bekannten Henne-/Ei-Problems: wer war zuerst da – oder in diesem Fall: wer wird zuerst benötigt.

Die in der Überschrift genannten Haushaltsgeräte Föhn und Staubsauger verfügen beide über einen Elektromotor. Bohrmaschine, Waschmaschine, Mixer sind andere prominente Beispiele, ja sogar in elektrischen Zahnbürsten sowie den meisten Kühl- und Gefrierschränken findet sich ein Elektromotor.

Wie aber wird nun elektrische Energie in eine Bewegung umgesetzt? Konkret: Wie arbeitet ein Elektromotor und setzt das Gebläse im Föhn in Bewegung?

Die technische Grundlage wurde bereits Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckt und kurze Zeit später in den – auch heute noch gültigen –

4) Mehr als Sonne, Wind und Wasser – Energie für eine neue Ära, Ch. Synwoldt, Wiley-VCH, 2008.

Maxwell'schen Gleichungen festgehalten.[5] Das Verständnis der Elektrodynamik ermöglicht die Berechnung elektrischer Hochspannungsanlagen zur Energieübertragung gleichermaßen wie die Beschreibung der Vorgänge in einem Waschmaschinenmotor oder einer Fernsehantenne, ja selbst den Entwurf mikroelektronischer Schaltkreise!

Mit einfachen Worten lässt sich die Kernaussage auch ohne physikalische Details und Kenntnisse der Vektoranalysis wie folgt ausdrücken: *Ein von einem elektrischen Strom durchflossener Draht erfährt in einem Magnetfeld eine Kraft.* Diese Kraft bewegt den Draht, genauer: sie beschleunigt ihn. Im technischen Sinn bedeutet eine *Beschleunigung* die Änderung der Geschwindigkeit – das kann sowohl die Höhe der Geschwindigkeit als auch die Richtung des bewegten Körpers betreffen. Ein sich auf einer Kreisbahn bewegender Gegenstand erfährt kontinuierlich eine Beschleunigung – selbst wenn die Rotation mit gleich bleibender Drehzahl stattfindet. Bei jeder Kurvenfahrt in einem Fahrzeug lässt sich dies nachvollziehen: Die Fahrgäste werden zur kurvenäußeren Seite gedrückt – obwohl die Fahrzeuggeschwindigkeit laut Tachometer konstant bleibt, erfahren wir eine Kraftwirkung. Verliert das Fahrzeug auf einer Eisfläche seine Bodenhaftung, rutscht es geradeaus in den Fahrbahnrand, weil die Haftreibung der Reifen auf der Eisfläche stark nachlässt und die Führung quer zur Bewegungsrichtung damit verloren geht.

Elektromotorisches Prinzip

Ein Magnetfeld übt auf einen Draht, der von einem elektrischen Strom durchflossenen wird, eine Kraft aus. Voraussetzung dafür ist, dass das Magnetfeld und der elektrische Strom im Draht einen rechten Winkel bilden.

Elektromotoren wie auch Generatoren arbeiten nach dieser Methode. Damit es zu einer fortlaufenden Rotation kommen kann, muss jedoch – synchron zur Rotation – entweder der Stromfluss durch den Draht umgepolt (»kommutiert«) oder ein rotierendes Magnetfeld aufgebaut werden.

Der wesentliche Unterschied zwischen Elektromotor und Generator: Während beim Elektromotor ein elektrischer Strom für das Bereitstellen von mechanischer Leistung erforderlich ist, wird in Generatoren durch die mechanische Bewegung innerhalb eines Drahtes ein elektrischer Strom induziert. Ursache und Wirkung verhalten sich in beiden Fällen genau spiegelbildlich.

---

5) Der sich aus den Maxwell'schen Gleichungen ergebende Widerspruch zur Newton'schen Mechanik und zum Galilei'schen Relativitätsprinzip wurde erst im Jahre 1905 von Albert Einstein durch die spezielle Relativitätstheorie aufgelöst.

Die Schlüsselfrage für eine technische Realisierung lautet jedoch, wie wird ein hinreichend starkes Magnetfeld aufgebaut, damit die elektromotorischen Kräfte eine technisch nutzbare Größenordnung erreichen? Hochleistungsfähige Permanentmagneten waren über lange Zeit – sofern überhaupt – nur im Labormaßstab, nicht jedoch für industrielle Zwecke verfügbar.

Elektrodynamisches Prinzip

Ein von einem elektrischen Strom durchflossener Draht erzeugt ein Magnetfeld.

Dies ist die Basis für den Aufbau von Elektromagneten und eine wichtige Voraussetzung für den Aufbau von leistungsstarken Elektromotoren und Generatoren. Da das Magnetfeld für den Antrieb des Elektromotors beziehungsweise für die Stromerzeugung im Generator ursächlich ist, wird allgemein von einer Erregerwicklung gesprochen.

Erst in den letzten Jahren kommen vermehrt auch durch Permanentmagneten erregte Maschinen zum Einsatz.

Je nachdem, wie das Magnetfeld erzeugt wird, spielt der elektrische Strom in einem Elektromotor also gleich an mehreren Stellen eine entscheidende Rolle: in jedem Fall im Strom durchflossenen Leiter – in der Regel in Form einer oder mehrerer Spulen, die auf einen Anker gewickelt sind (*Rotor*) – sowie gegebenenfalls auch für das Bereitstellen des erforderlichen Magnetfeldes durch eine Erregerwicklung (*Stator*) .

Bezogen auf das Ausgangsbeispiel, unseren Föhn, wird die elektrische Energie auf zweierlei Weise umgesetzt, zum Heizen und für den Betrieb des Gebläsemotors. Das Prinzip der elektrischen Heizung wurde bereits eingangs dieses Abschnitts näher betrachtet. Der wesentliche Unterschied zur Heizwendel in der Glühlampe betrifft das Temperaturniveau, das beim Haartrockner deutlich niedriger ist. Dennoch sollte unbedingt beachtet werden, dass ein Blockieren des Lüftergebläses fatale Folgen haben kann: Ohne den Luftstrom fehlt der Heizwendel die notwendige Kühlung, sie würde innerhalb weniger Sekunden überhitzen und es besteht Brandgefahr. Eine solche Situation kann nicht nur aus einer absichtlichen Manipulation herrühren, sondern beispielsweise auch durch fliegende Haare, die durch den Lufteinlass angesaugt wurden, oder einen verschleißbedingten Lagerschaden des Lüfterrads entstehen. – In allen Fällen heißt es: Dreht der Motor nach dem Einschalten nicht wie gewohnt hoch, ist der Föhn sofort abzuschalten!

Und noch eine Vorsichtsmaßnahme sei erwähnt: Auch wenn der Föhn ein Kunststoffgehäuse besitzt, das den direkten Kontakt mit spannungsführenden Teilen verhindert, so ist indirekt über den Ansaug- und Auslasskanal ein mittelbarer Zugang möglich. Dies betrifft nicht nur eine mutwillige mechanische Berührung durch Werkzeuge, sondern vor allem auch den eher unbeabsichtigten Kontakt mit Wasser und Feuchtigkeit! Bei Letzteren handelt es sich durchaus um gute elektrische Leiter, insbesondere wenn Seifen, Salze und dergleichen im Spiel sind. Der Anschluss und Betrieb auch anderer Elektrogeräte im Badezimmer wie Lampen, elektrische Rasierer oder Zahnbürsten sollte daher stets außerhalb des Spritzwasserbereichs erfolgen und immer mit einem Fehlerstromschalter (siehe Seite 8) abgesichert sein.

Beim Staubsauger spielt ein Elektromotor die Hauptrolle. Er erzeugt – im Gegensatz zum Föhn – jedoch einen in die entgegengesetzte Richtung gerichteten Luftstrom. In der Regel ist die Motordrehzahl elektronisch einstellbar und auf diesem Weg eine Leistungsregelung der Saugkraft möglich.

Da im Einschaltmoment der Motor praktisch ohne mechanischen Widerstand arbeitet – eine nennenswerte Saugwirkung entsteht erst bei höheren Motordrehzahlen – kam es gerade bei älteren Modellen häufig zu einem Auslösen der betreffenden Sicherung im Haushaltsanschlusskasten. Dies lässt sich bei in der Drehzahl regelbaren Geräten jedoch wirkungsvoll verhindern, wenn vor dem Einschalten eine niedrigere oder mittlere Drehzahl eingestellt wird.

Das in modernen Gebäudeinstallationen aufgegriffene Konzept eines Zentralstaubsaugers ist technisch gesehen übrigens keine wirkliche Innovation: Als Ende des 19. Jahrhunderts die ersten Staubsauger aufkamen, handelte es sich dabei um alles andere als handliche Geräte. Über lange Schlauchleitungen wurden die Saugdüsen an manuell oder motorisch betriebenen Luftpumpen angeschlossen. Bis weit ins 20. Jahrhundert dominierten Hausstaubsauger den Markt: Über ein weit verzweigtes Rohrsystem standen in praktisch jedem Raum Anschlusspunkte für die Saugdüsen zur Verfügung. Als Antrieb arbeitete im Keller ein leistungsfähiges Aggregat. Ein Luxus, der wenigen Wohlhabenden und einer gewerblichen Nutzung vorbehalten blieb.

Die Vorteile liegen auch 100 Jahre später klar auf der Hand: Bei herkömmlichen Geräten wird zwangsläufig durch den Luftaustritt eine starke Luftströmung in Bodennähe erzeugt. Auf der einen Seite wird

der Staub gesaugt, während er auf der anderen aufgewirbelt wird – ein selten beachteter Interessenkonflikt! Zudem ist der Betrieb des leistungsstarken Elektromotors (1.000–2.000 W) mit einer mehr oder weniger großen Geräuschentwicklung verbunden; beide Probleme lassen sich durch den Betrieb eines Zentralstaubsaugers wirkungsvoll vermeiden. Neben der aufwändigeren Wartung sei jedoch insbesondere auf den Aspekt der benötigten Leistung hingewiesen. Je nach Länge des Rohrleitungssystems kommt es zwangsläufig zu Einbußen bei der Saugkraft, hier kann nur ein stärkerer Antrieb Abhilfe leisten.

Ein weiterer, in privaten Haushalten meist zu vernachlässigender Effekt besteht zudem im erhöhten Staubeintrag. Durch den Betrieb der Saugdüse entsteht im jeweiligen Raum zwangsläufig ein, wenn auch geringer, Unterdruck – schließlich befindet sich der Luftauslass in einem anderen Raum und kann zu keinem direkten Ausgleich führen. Durch Türen und Fenster, aber auch durch Ritzen und andere Öffnungen ist daher eine vermehrte Luftzufuhr und in der Konsequenz ein erhöhter Staubeintrag zu beobachten. Industrielle Reinräume werden aus diesem Grund mit einem gewissen Überdruck gegenüber der Umgebung betrieben.

Mikrowelle und Induktionsherd – Wärme einmal anders

Wenn von elektrisch betriebenen Geräten zur Wärmeerzeugung gesprochen wird, fällt der Blick sofort auf das Prinzip der Widerstandsheizung, wie es in Föhn, Wasserkocher, Heizlüfter, Bügeleisen, Herd und Backofen üblicherweise angewandt wird. Doch es gibt zwei wichtige Ausnahmen, den Mikrowellenofen (*Mikrowelle*) und den Induktionsherd. Beide Geräte unterscheiden sich grundlegend von den oben genannten Wärmegeräten.

Anders als bei einem konventionellen Elektroherd, der das zu garende Gut nur indirekt über das Heizelement in der Herdplatte und den Kochtopf erwärmt, wird Wasser oder eine Wasser enthaltende Speise im Mikrowellenofen direkt erhitzt. Wie die Bezeichnung bereits andeutet, wird dafür Mikrowellenstrahlung eingesetzt. Als Strahlungsquelle dient ein mit Hochspannung betriebenes Magnetron mit einer Frequenz von 2,45 GHz. Dessen Strahlung wird von Wassermolekülen aufgenommen (*absorbiert*) und in Wärme umgesetzt – verantwortlich dafür sind dielektrische Verluste im Wasser,

nicht, wie häufig vermutet wird, Resonanzerscheinungen. Letztere würden erst bei deutlich höheren Frequenzen auftreten.

Die Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlen – Wellenlänge: 12 cm – beträgt nur wenige Zentimeter. Sie erhitzen ausschließlich Wasser, andere Bestandteile des Garguts werden nur durch das umgebende beziehungsweise enthaltene Wasser erwärmt. Für eine gleichmäßige Erwärmung ist es daher erforderlich, dass sich das Strahlungsfeld im Mikrowellenofen gleichmäßig verteilt. Dies kann sowohl durch einen Drehteller, auf dem die zu erwärmende Speise platziert wird, als auch durch einen innerhalb des Gerätes angebrachten Metallrotor erfolgen. Andernfalls könnte es zu lokal sehr starker Erhitzung oder sogar Verbrennungen kommen; ein Betrieb mit leerem Garraum ist unbedingt zu vermeiden. Da die Absorbtion der Mikrowellenstrahlen stark von den einzelnen Bestandteilen des Gargutes abhängt, kann es zu nennenswerten Temperaturunterschieden innerhalb des Gargutes und somit unvollständigem Durchgaren kommen. Abhilfe ist durch längeres Garen bei reduzierter Leistung und unter Nutzung einer geeigneten Abdeckung möglich. Analoges gilt auch für das Auftauen von Gefrorenem; die Absorbtion der Mikrowellenstrahlung durch Eis ist bedeutend niedriger als durch flüssiges Wasser, so dass sich ein Mikrowellenofen nur bedingt zum Auftauen eignet. Vorsicht ist bei einigen, porösen Geschirrteilen geboten: Dringt Feuchtigkeit in die Poren, kann sich das Geschirr gegebenenfalls stärker erwärmen, als das Gargut! In jedem Fall sind flache, möglichst runde Gefäße zu bevorzugen.

Die Abwärme des Magnetrons wird zusätzlich dem Garraum zugeführt, dennoch liegt der Wirkungsgrad lediglich in der Größenordnung von 50–60 %. Der Vorteil der direkten Heizung kommt insbesondere beim Erwärmen kleiner Mengen Wasser – eine Tasse Milch, Tee oder Kaffee – zur Wirkung und trägt hier zu einer Reduzierung des Energiebedarfs bei. Auch für das Erwärmen bereits gegarter Speisen ist ein Mikrowellenofen zweckmäßig.

Um die Umgebung vor der Strahlung des Magnetrons zu schützen, wird ein geschlossenes Metallgehäuse verwendet. Das spezielle Profil der Tür und lediglich kleine Öffnungen im Gitter hinter der Frontscheibe stellen eine wirkungsvolle Abschirmung dar. Durch einen Sicherheitsmechanismus wird gewährleistet, dass bei geöffneter Tür ein Einschalten unmöglich ist. Diese Vorsichtsmaßnahmen sind erforderlich, da nach außen dringende Mikrowellenstrahlung zur Erwärmung von menschlichem Gewebe, schlimmstenfalls auch Ver-

brennungen führen kann. Mikrowellengeräte mit beschädigter Tür sollten unbedingt außer Betrieb genommen werden.

Strahlende Nahrung? – Strahlende Umgebung?

Um die Antwort gleich vorweg zu nehmen: Nein – Mikrowellengeräte haben nichts mit ionisierender Strahlung, wie sie von Röntgenapparaten oder kerntechnischen Anlagen ausgeht, zu tun. Weder vom Innenraum des Mikrowellenofens noch vom Gargut geht eine[6] gefährdende Strahlung aus; ist das Gerät ausgeschaltet, existiert keine Mikrowellenstrahlung mehr.

Größere Sorge wäre in diesem Zusammenhang bei typischen Mikrowellengerichten angebracht: Fertiggerichte sind aus ernährungsphysiologischer Sicht selten als besonders wertvoll einzustufen. Ein weiterer Aspekt ist die ungleichmäßige Erwärmung innerhalb des Garguts: Mageres Fleisch erwärmt sich stärker als fettes Fleisch oder Knochen – daraus resultiert die Gefahr, das gegebenenfalls vorhandene Keime nicht vollständig abgetötet werden.

In wie weit eine chemische Veränderung von Nahrungsmittelsubstanzen durch das Erwärmen in Mikrowellenöfen möglich ist oder tatsächlich stattfindet, wird in entsprechenden Studien sehr unterschiedlich bewertet. Grundsätzlich ist die Problematik jedoch beim konventionellen Kochen oder Backen ebenfalls nicht auszuschließen.

Ein Betrachten des Geschehens im Mikrowellenofen aus kurzer Distanz und für längere Zeit sollte hingegen vermieden werden: Gerade die Augen sind gegenüber der aus der Tür und Fensterblende austretenden Reststrahlung besonders empfindlich, da hier die geringe Durchblutung keinen hinreichenden Abtransport der Wärme ermöglicht. Im Extremfall könnte es zu einer Erblindung kommen. Dazu sei angemerkt, dass Mobiltelefone, die in einem ähnlichen Frequenzbereich (D-Netz: 0,9 GHz; E-Netz: 1,8 GHz; Mikrowellengerät: 2,45 GHz) arbeiten und direkt an den Kopf gehalten werden, eine ähnliche Leistungsdichte wie die Reststrahlung unmittelbar vor der Tür eines Mikrowellenofens aufweisen. Mehr zu diesem Thema im Abschnitt *Warme Ohren* ab Seite 85.

Der Vollständigkeit halber seien an dieser Stelle noch Radargeräte erwähnt, die ebenfalls mit Mikrowellenstrahlung arbeiten. Radargeräte senden jedoch notwendigerweise ohne Abschirmung und mit wesentlich höheren Leistungen als Mikrowellenöfen, so dass ein Aufenthalt in ihrer Nähe unbedingt vermieden werden muss. Zusätzlich entsteht durch die zum Betrieb dieser Anlagen erforderliche Hochspannung auch UV-Strahlung, von der ein weitaus höheres Gesundheitsrisiko ausgeht.

6) Genau genommen geht von jedem Körper, der wärmer als seine Umgebung ist, eine Wärmestrahlung im Infrarotbereich aus – aber dies gilt beispielsweise auch für Heizkörper oder Kaminfeuer. Strahlung im Infrarotbereich hat eine höhere Frequenz als Mikrowellenstrahlung und verfügt daher – bei gleicher Feldstärke – über eine höhere Energie.

Auch die Funktionsweise eines Induktionsherds beruht auf elektromagnetischen Feldern, jedoch in einem wesentlich niedrigeren Frequenzbereich. Typischerweise arbeiten Induktionsherde nur knapp oberhalb der Hörschwelle, in einem Bereich von 25–50 kHz. Die Wärme wird hier nicht in der Herdplatte erzeugt, sondern direkt im Boden des Kochtopfes. Voraussetzung dafür ist, dass der Kochtopf – oder zumindest dessen Boden – aus einem ferromagnetischen und elektrisch leitfähigen Material besteht. Glas, Keramik, Aluminium und auch einige Edelstähle kommen daher nicht in Frage, Eisen und die meisten Stahlkochtöpfe sind hingegen für den Einsatz auf einem Induktionsherd geeignet.

Ist der Kochtopf für den Induktionsherd geeignet?

Ein einfacher Test erlaubt die Einstufung in geeignet oder ungeeignet. Bleibt ein beliebiger Magnet am Topf- oder Pfannenboden haften, so kann das Kochgeschirr auf einem Induktionsherd zum Einsatz kommen.

Das Prinzip des Induktionsherds ist einfach erklärt, eine Spule unterhalb der Herdplatte sendet ein starkes elektromagnetisches Wechselfeld, das im Boden des Kochtopfes einen Wirbelstrom erzeugt und dadurch zu einer sofortigen und starken Erwärmung führt. Das Kochen auf einem Induktionsherd ist eher mit einem Gasherd vergleichbar, wo ein Nachregeln der Flamme auch unmittelbar zu einer Temperaturänderung führt. Demgegenüber zeigen konventionelle Elektroherde ein wesentlich trägeres Verhalten, da zunächst die Kochplatte sich erwärmen bzw. abkühlen muss. Ebenfalls vorteilhaft ist die Tatsache, dass Topfboden und Sendespule keinesfalls dieselbe Größe haben müssen: Der ferromagnetische Topfboden führt zu einer Konzentration des von der Sendespule ausgehenden Felds, die elektromagnetische Abstrahlung an die Umgebung ist minimal. Ansonsten unerwünschte Verluste durch die Ummagnetisierung sind im Topfboden durchaus willkommen – auch sie führen zu einer Erwärmung.

Die Herdplatte selber wird nicht geheizt; nur durch den heißen Topfboden erfährt sie eine mittelbare Erwärmung. Das Berühren einer eingeschalteten Kochstelle, auf der kein Topf steht, ist also ungefährlich. Allerdings kann das Betriebsgeräusch von Lüfter (für die Leistungselektronik in der Herdplatte) und durch leichte Schwingungen des Kochtopfes lästig sein.

Es ist jedoch zu beachten, dass in der näheren Umgebung des Induktionsherds starke magnetische Felder existieren, was bei empfindlichen Geräten wie beispielsweise Herzschrittmachern zu Beeinträchtigungen der Funktion führen kann. Letztlich können durch das vergleichsweise starke magnetische Wechselfeld auch im menschlichen Organismus Wirbelströme induziert werden – wenn auch viel kleinere als im Boden des Kochtopfes. Dadurch kann sich Gewebe erwärmen und es ist – zumindest theoretisch – nicht auszuschließen, dass Zellen dadurch beeinflusst werden. Auf Grund der niedrigeren Frequenz ist die Absorbtion in menschlichem Gewebe jedoch wesentlich geringer als beispielsweise bei Mikrowellenstrahlung. Im Abschnitt *Warme Ohren* werden ab Seite 89 die REFLEX-Studie und deren Ergebnisse vorgestellt. – Es ist dabei jedoch unbedingt zu beachten, dass diese Studie *hoch*frequente Felder von Mobiltelefonen (1,8 GHz) als Untersuchungsgegenstand hatte und nicht *nieder*frequente Felder von Induktionsherden (30 kHz); eine direkte Übertragung der Ergebnisse also wissenschaftlich nicht haltbar ist.

Magnetische Felder

Generell gilt, ist der Herd ausgeschaltet, gibt es auch kein magnetisches Wechselfeld. Bei eingeschaltetem Herd konzentriert sich die meiste Energie des magnetischen Feldes auf den Boden des Kochtopfs, so dieser über einen geeigneten Boden verfügt!

Nur wenn bei eingeschaltetem Herd *kein* Topf auf der Herdplatte steht, verteilt sich das Feld um das Kochfeld. Die Abnahme der Feldstärke ist dabei proportional zum Quadrat der Entfernung – einfacher ausgedrückt, viel Abstand hilft besonders viel. Moderne Herde schalten beim Entfernen des Topfes automatisch ab.

Netzgeräte – Strom für jeden Zweck

Bei den bislang betrachteten Beispielen für Elektrogeräte standen ausschließlich *große Verbraucher* im Mittelpunkt. Sie alle werden direkt mit der an den Klemmen der Steckdose anliegenden Wechselspannung von 230 V (Europa) oder 120 V (USA) betrieben.

Gerade elektronische Schaltungen benötigen jedoch eine weitaus niedrigere Betriebsspannung, ein direkter Anschluss an die Haushaltsspannung würde regelmäßig zur unmittelbaren Zerstörung führen. Zudem ist in der Regel eine Gleichspannungsversorgung erfor-

derlich. Beispiele für entsprechende Geräte sind Computer ebenso wie Radios, Uhrenwecker, Hifi-Anlagen, Telefone und elektrische Zahnbürsten.

Dabei fallen zwei, sich überschneidende Gruppen von Geräten in dieser Aufzählung auf: zum einen diejenigen, die auch drahtlos – also mit einer gegebenenfalls wiederaufladbaren Batterie – betrieben werden können, und auf der anderen Seite jene, die elektronische Komponenten beinhalten. Hier wird die Funktion des Netzgeräts besonders augenscheinlich: Es formt die gefährlich hohe Wechselspannung in eine niedrigere Gleichspannung um – sei es zum Aufladen von Batterien oder dem Betrieb elektronischer Schaltungen.

Bei einigen der oben genannten Geräte ist das Netzteil ausgelagert und befindet sich in einem separaten Gehäuse, meist direkt mit dem Anschlussstecker für die Haushaltssteckdose versehen – das *Steckernetzteil*. Es erlaubt die sichere und auch räumliche Trennung von Hochspannung und Niederspannung, was unter anderem bedingt, dass das Anschlusskabel zum Gerät nur noch eine Niederspannung führt und entsprechend geringeren Ansprüchen bezüglich der Isolierung genügen muss.

Andererseits befindet sich in den seltensten Fällen ein Ein- und Ausschalter im Steckernetzteil. Das führt dazu, dass auch bei ausgeschaltetem Gerät das Steckernetzteil immer eingeschaltet ist. Hier muss klar zwischen dem Nutzen – beispielsweise dem sporadischen Aufladen der Batterie eines drahtlosen Telefons oder einer elektrischen Zahnbürste – und dem permanenten Energiebedarf differenziert werden. Bereits wenig mehr als 1 W Leistungsaufnahme summieren sich zu einem jährlichen Energiebedarf von 10 kWh. Bei einer Hand voll kleiner Steckernetzteile kommen so schnell einige Hundert Kilowattstunden jährlich zusammen. Anstelle eines kontinuierlichen Betriebs ist das zeitlich begrenzte Aufladen – in der Regel nur wenige Stunden pro Woche – also durchaus in Erwägung zu ziehen. Anders verhält es sich mit tatsächlich dauernd zu betreibenden Geräten wie beispielsweise einer Telefonanlage oder einem Faxgerät. Hier ist ein Abschalten nur in wenigen Fällen zweckmäßig.

Und in noch einer weiteren Kategorie von Geräten spielt das Konzept des *always on* eine wichtige Rolle: Ob Fernseher, Videorekorder, DVD-Player oder Hifi-Anlage, alle verfügen über eine Fernbedienung – nicht nur für die Wahl des Programms und der Lautstärke, sondern auch zum Ein- und Ausschalten.

AVM
AC/DC Adapter
AVM
CE
CE
CE

der westlichen Welt auf das Konto von bis zu 20 verschiedenen Geräten (pro Haushalt!) mit Stand-by-Funktion geht. Hinzu kommen zahllose Geräte in Büros und Industrie. Daher schlug die IEA bereits 1999 vor, die Ruheleistung für den Stand-by-Betrieb grundsätzlich auf 1 W zu begrenzen.[8)]

8) Mehr als Sonne, Wind und Wasser – Energie für eine neue Ära, Ch. Synwoldt, Wiley-VCH, 2008.