

5. Das Stromnetz und Unfallverhütung

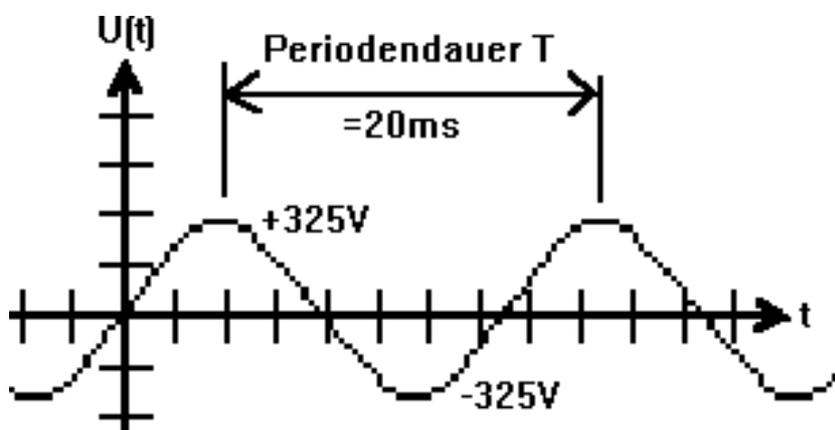
5.1 Netzkenngrossen

Kennzeichen unseres Stromnetzes:

- Spannung: **U = 230 V** Wechselspannung, sinusförmig.
(Strom ändert dauernd seine Richtung, die Spannung ändert ihr Vorzeichen +/-)

230 V ist der Effektivwert, die Spitzenwerte im positiven und negativen Bereich betragen $\sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} = \pm 325 \text{ V}$

- Frequenz: **f = 50 Hz** (Hz=Hertz, entspricht 50 Schwingungen pro Sekunde)
Periodendauer $T = 20\text{ms}$ ($T = 1 / f$ $f = 1 / T$)



- Das Netz ist eine **Spannungsquelle**, das heisst, die Spannung wird konstant gehalten.
- Diese Quelle hat einen sehr kleinen Innenwiderstand, bei Belastung des Netzes soll die Spannung kaum absinken.
- Der **entnehmbare Strom I** in Ampère (A) bzw. die Leistung sind theoretisch **unbeschränkt**.
In der Praxis sind ihnen durch die **Leitungsdurchmesser** Grenzen gesetzt. Da nicht beliebig dicke Leitungen verlegt werden können und der Strom die Leitungen erwärmt, muss **der maximale Stromfluss begrenzt** werden. Dies geschieht durch **Sicherungen**, auch Leitungsschutzschalter genannt. Sie **schützen die Installationen** vor den Folgen von Überlastungen und Kurzschlüssen.
Im Haushalt trifft man folgende Sicherungswerte an:
 - 6 A für ältere Installationen (Leitungsquerschnittsfläche 1.0 mm^2)
 - 10 A im Normalfall (Leitungsquerschnittsfläche $1,5 \text{ mm}^2$). Damit können pro Sicherungskreis 2300 W Leistung bezogen werden
 - 16 A für Kochherde, Boiler, Waschmaschinen, Tumbler

5.2 Spannungserzeugung

Wie wird überhaupt die Netzspannung erzeugt?

Hier als Zusammenstellung die verschiedenen prinzipiellen Arten und Prinzipien zur Spannungserzeugung.

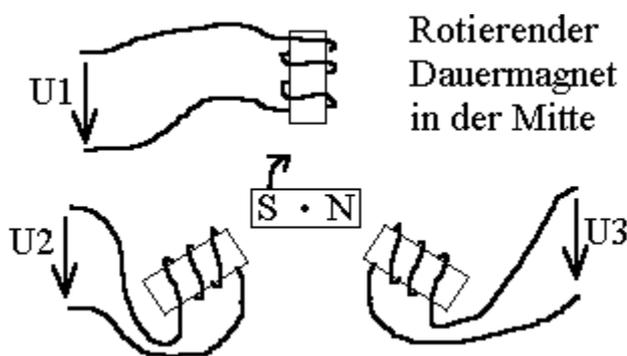
Art der Spannungserzeugung (in Klammer das Energiewandlungsverfahren)	Prinzip	Eigenschaften	Wirkungsgrad	Beispiele/Anwendungen
Reibung (mechanisch)	Ladungstrennung auf leitenden Körpern oder auch Isolatoren	Extrem hohe Spannungen möglich, aber nur geringe Leistungen. Nur Gleichspannung.	Extrem klein	Gewitter-Blitze, statische Aufladungen
Wärme (physikalisch)	Zwischen zwei unterschiedlichen Metallen in der Wärme entsteht eine Spannung	kleine Spannung, kleine Leistung. Nur Gleichspannung.	Klein	Thermoelemente als Kühlelemente für Halbleiter oder kleine Kühlschränke, oder elektrisch auswertbare Temperatursonden
Kristallverformung (mechanisch)	Sogenannter Piezoeffekt. Gewisse Kristalle erzeugen bei Druck eine Spannung	Sehr hohe Spannungen möglich, nur kleine Leistungen Vor allem Gleichspannung. Prozess ist umkehrbar	Sehr klein	Tonabnehmer von Plattenspielern, Mikrofone, Elektrische Drucktasten, Feueranzünder
Licht (physikalisch)	Innerer Fotoeffekt: Elektronen in bestrahlten Halbleiterkristallen werden zu freien Elektronen und erzeugen einen Strom	Kleine Spannungen (Größenordnung 0.5 - 1V), Beliebig grosse Stromstärken möglich, abhängig von bestrahlter Fläche. Nur Gleichspannung.	Heute ca 15% bei Solarzellen	Solargeneratoren, Solarzellen
Galvanische Elemente (Chemisch)	Galvanisches Element. Zwischen zwei Stoffen (Metallen) in einem Elektrolyten (leitende Flüssigkeit) baut sich eine Spannung auf.	Kleine Spannungen (0.5 - ca 3V) je nach chemischen Elementen. Nur Gleichspannung.	nicht definierbar, da begrenzte Lebensdauer. Umwandlung relativ effizient, aber Herstellung sehr aufwändig.	Batterien, Akkus.

Brennstoffzelle (Chemisch)	Erzeugt Spannung aus der Reaktion (Verbrennung) von Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasserdampf.	Prozess ist umkehrbar, durch Strom kann Wasser in O ₂ und H ₂ aufgetrennt werden Nur Gleichspannung	Sehr effizient	Brennstoffzelle in Zukunft als „Akku“ (Speicher) von solar erzeugtem Strom, heute schon Verwendung als absolut abgasfreier Autoantrieb möglich
Induktiv (mechanisch)	Wenn ein veränderliches Magnetfeld auf eine Spule wirkt, wird darin eine Spannung induziert.	Theoretisch beliebige Spannungen und Leistungen erzeugbar. Wechselspannung oder pulsierende Gleichspannung.	80% und mehr. Effizienteste Erzeugungsart.	Generatoren, Dynamos

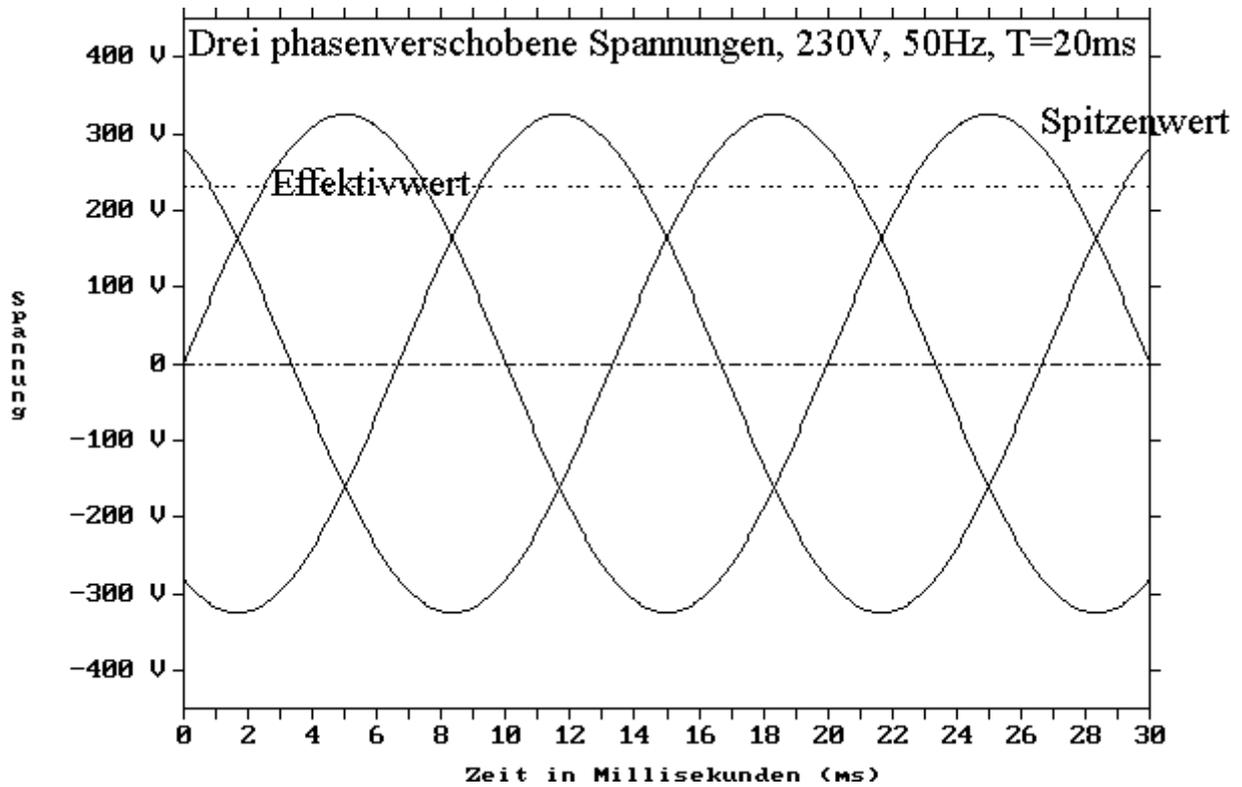
Die **induktive** Spannungserzeugungsart ist für das **Stromnetz** die sinnvollste, da weitaus am effizientesten und die einzige, die Wechselspannungen erzeugt. Auf diese Weise lässt sich mechanische Arbeit direkt in elektrische Energie umwandeln. Der Energiewandler heisst **Generator**.

Prinzip eines Generators

Ein Generator besteht im Prinzip aus einem System von Spulen und Magneten. Das Induktionsgesetz besagt, dass ein veränderliches Magnetfeld in einer Spule eine Spannung induziert. Das erforderliche **veränderliche** Magnetfeld erhält man dadurch, dass der **Magnet oder die Spule bewegt** wird. Nur dann (bei Bewegung) wird eine Spannung induziert. Die Kraftwerksgeneratoren haben nicht nur eine Spule, sondern **drei Spulen**, die um jeweils **120 Grad versetzt** angeordnet sind. In der Mitte ist ein Magnet, der mechanisch zur Rotation gebracht wird (durch die Wasser- oder Dampfturbine). Durch das kreisförmige Annähern und Entfernen der beiden Magnetpole an die Spule wird eine harmonische Schwingung erzeugt und damit die sinusförmige Wechselspannung induziert.



In jeder der drei Spulen wird eine Sinusspannung erzeugt. Da der Magnet zu verschiedenen Zeiten bei den verschiedenen Spulen vorbeikommt, werden auch die erzeugten Spannungen um jeweils 1/3 der Periode oder 120 Grad (=1/3 von 360 Grad) **phasenverschoben**.



Einschub/Repetition: Die Phase und die Zeigerdarstellung

Die **Phase** (oder **Phasenlage** oder **Phasenverschiebung**) ist die zeitliche "Distanz" von 2 Wechselgrößen mit **gleicher** Frequenz.

Als Verschiebungs"distanz" wird meist nicht die Zeit angegeben, sondern der Phasenverschiebungswinkel. **360 Grad** entspricht **einem Umgang**, also einer **Periodendauer T**.

Die Spitzenwerte der beiden Wechselgrößen brauchen jedoch nicht gleich gross zu sein, aber sie können es, wie zum Beispiel bei unserem dreiphasigen Stromnetz.
(Zwischen zwei Größen **ungleicher** Frequenz kann man keine Phasenverschiebung definieren.)

Zeit als Bruchteil der Periodendauer T	Phasenwinkel in Grad	Phasenwinkel im Bogenmass
T	360°	2π
T/2	180°	π
T/4	90°	π/2
3*T/4	270° = -90°	3*π/2 = -π/2
T/3	120°	2*π/3
T/6	60°	π/3
T/8	45°	π/4
T/12	30°	π/6

Die Zeigerdarstellung

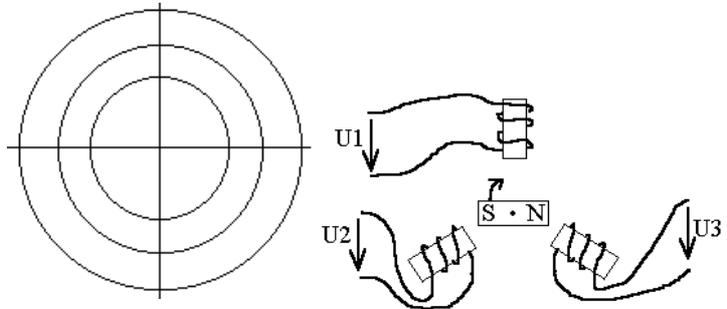
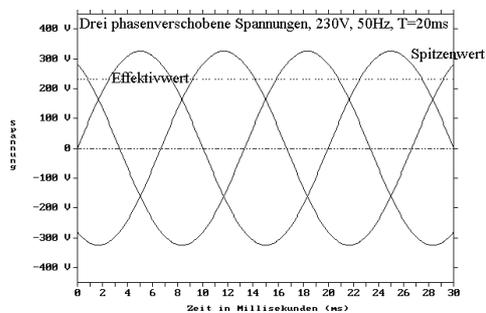
Anstelle des zeitlichen Verlaufs ("Sinuskurve", z.B. im U-t-Diagramm) kann man Sinusgrößen auch in einem Zeigerbild darstellen. Dies macht eigentlich nur Sinn, wenn man mindestens 2 Sinusgrößen mit unterschiedlicher zeitlicher Verschiebung (Phase) betrachtet (aber mit gleicher Frequenz!).

Eigenschaften und Vorteile der Zeigerdarstellung

- Die **Länge** des Zeigers entspricht dem **Spitzenwert** der Wechselgröße.
- Der Zeiger denkt man sich rotierend im Gegenuhrzeigersinn. Der zurückgelegte Drehwinkel des Zeigers entspricht der Zeit.
- Die Drehzahl pro Sekunde entspricht der Frequenz der Wechselgröße.
- Eine Phasenverschiebung zweier Größen ist direkt als Winkel zwischen den entsprechenden Zeigern ablesbar.
- Zwischen der Zeit und dem Winkel besteht ein klarer Zusammenhang. Eine Periodendauer T entspricht dabei einem Umlauf des Zeigers, also dem Winkel 360° oder 2π im Bogenmass. Bruchteile müssen umgerechnet werden.
- Den Momentanwert kann man aus Zeigerlänge mal Sinus des Drehwinkels ermitteln; es ist gleichzeitig die Länge des Lots von der Zeigerspitze auf die horizontale Mittelachse durch den Kreis.
- Zeiger lassen sich vektoriell (grafisch) addieren und subtrahieren. Damit kann man auf einfache Weise Summe und Differenz von zwei phasenverschobenen Sinusgrößen bilden. Der resultierende Zeiger stellt direkt den Betrag (Zeigerlänge=Spitzenwert) und die Phasenlage (Winkel) der neuen Wechselgröße dar.

5.3 Drehstrom: 3-Phasenstrom

Hier noch einmal die drei phasenverschobenen Spannungen ($1/3$ von T oder 120 Grad):
Linienbild (U-t-Diagramm) Zeigerbild



Die drei phasenverschobenen Spannungen ermöglichen den Bau besonders einfacher Motoren. Der Motor ist die mechanische und elektrische Umkehrung des Generators: Die drei Spulen werden ans Netz angeschlossen und zeitlich nacheinander vom Strom durchflossen. Auf den Magneten in der Mitte wirkt also eine drehende Kraft (Drehmoment).

Ein Stromsystem aus mindestens drei Phasen nennt man deshalb **Drehstrom**.

Durch die Phasenverschiebung entsteht aber noch ein weiterer Vorteil:

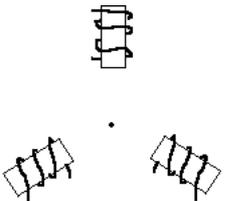
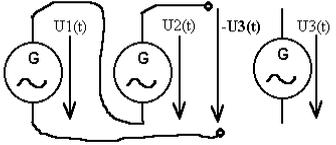
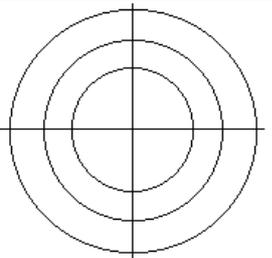
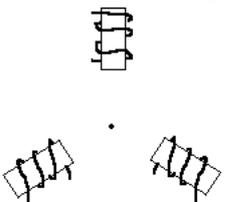
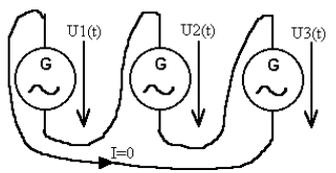
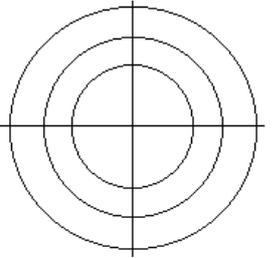
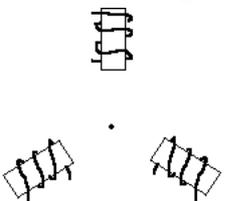
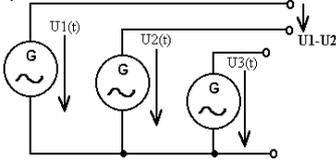
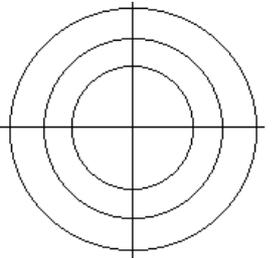
Man kann die drei Spannungsquellen in Serie schalten, ohne dass es einen Kurzschluss gibt, da sich die Spannungsschwingungen gegenseitig aufheben.

Dieser Vorgang heisst Verkettung.

In unserem Netz sind die drei Spannungsquellen verkettet:

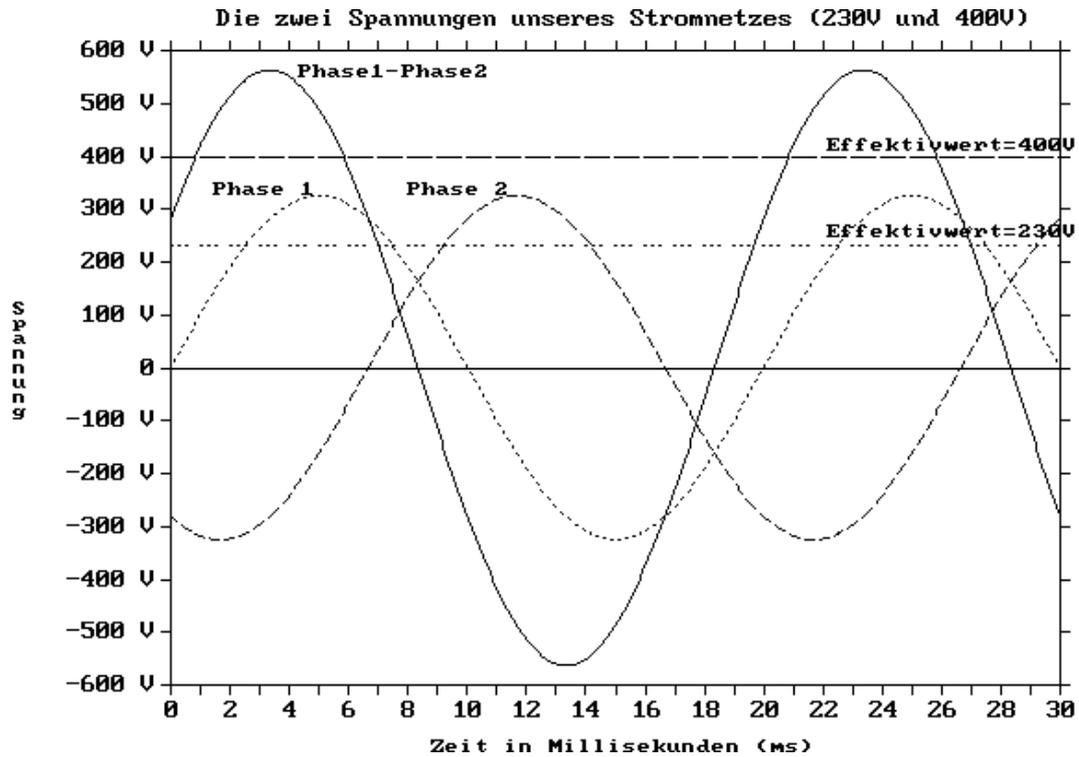
5.4 Phasenverschiebung -> Verkettung -> neue Spannung

Am einfachsten anhand des Zeigerbildes lassen sich gewisse Zusammenhänge herauslesen.

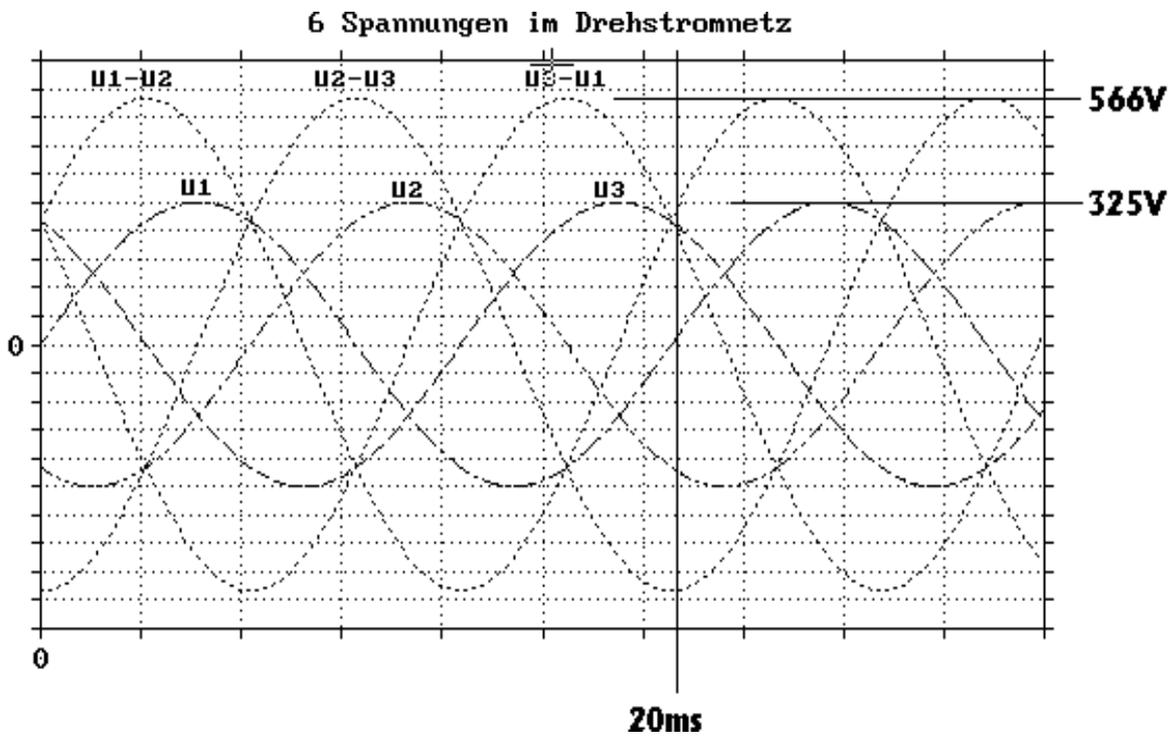
		<p>Die Summe von zwei der drei Spannungen ergibt die Umkehrung der dritten Phase. Also die an der t-Achse gespiegelte, um 180 Grad verschobene (gegenphasige) Spannung.</p>	
<p>Dreieckschaltung:</p> 		<p>Daraus folgt: Die Summe aller drei Spannungsquellen ist zu jedem Zeitpunkt null!</p>	
<p>Sternschaltung:</p> 		<p>Die Differenz aus zwei Phasen ergibt etwas Neues: Eine neue Spannung mit einer dazwischenliegenden Phasenverschiebung</p>	

5.5 Zwei Spannungen dank Phasenverschiebung

Das Resultat der Differenz aus zwei gleichen 230-V-Spannungen ist eine neue Spannung von 400 V. Das Verhältnis ist $\sqrt{3}$. $230 \text{ V} \cdot 1.732 = 400 \text{ V}$. Dies sind die Effektivwerte.



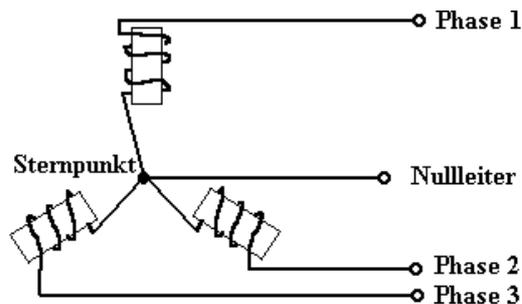
Bildet man alle drei möglichen Differenzen, so ergeben sich auch drei 400-V-Spannungen. Diese sind unter sich auch wieder um 120 Grad phasenverschoben
Die Spitzenwerte sind $\sqrt{2}$ mal grösser als die Effektivwerte, also 325 V bzw. 566 V.



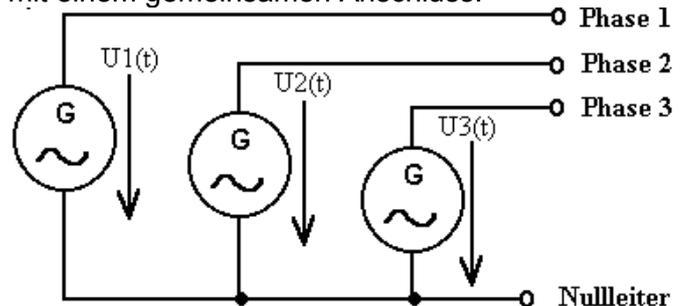
5.6 Sternschaltung, Drehstrom, Steckdosen

Wie erwähnt werden in unserem Netz die drei phasenverschobenen Spannungsquellen von 230 V **verkettet**: Das heisst, sie werden in der **Sternschaltung** zusammengeschaltet. Der Sternpunkt ist der gemeinsame Anschluss der drei Quellen. In unserem Netz heisst er Nullleiter oder Neutraleiter. Die Bezeichnung kommt daher, dass bei **gleicher Belastung aller drei Phasenleiter** (gleicher Strom) im **Nullleiter kein Strom** fliesst, weil sich die Rückströme gegenseitig aufheben (analog der Serieschaltung der drei Phasen, die als Summe Null ergibt, siehe 5.4).

Sternschaltung:



Entspricht der Zusammenschaltung dreier Quellen mit einem gemeinsamen Anschluss:

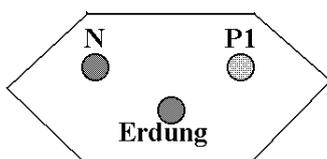


Vorteile von Drehstrom:

- 2 verschiedene Spannungswerte: 230 V und 400 V Effektivwert
- Drehstrom kann ein magnetisches Drehfeld erzeugen, was den Maschinenbau vereinfacht
- Einsparung von Leitungsmaterial: Statt 6 Leitungen für 3 Quellen braucht es nur 4 Leitungen, bei symmetrischer Belastung aller drei Phasen braucht es sogar nur 3 Leitungen (Dreieckschaltung, z.B. Energieverteilung: Hochspannungs-Transformatoren, ferner Motoren oder gewisse Heizungen).

Wegen der zwei Spannungen bei der Sternschaltung gibt es mehrere Typen von Steckdosen. Im Haushalt sieht man vor allem die Typen 12, 13 und 15

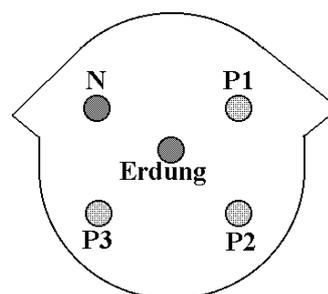
Eine Phase
Typ 12 (flach) und
Typ 13 (versenkt)



1x 230 V

"Normale" Steckdose

Drei Phasen
Typ 15 (versenkt)



3x 230V zwischen jeder Phase und Nullleiter,
3x 400V zwischen je zwei Phasen

Steckdose für Geräte mit grösserem
Leistungsbedarf und/oder Motoren:
Waschmaschinen, Geschirrspüler, Tumbler,
Heizungen, Boiler

5.7 Netzstruktur, Erdung

An den Steckdosen haben wir einen weiteren Pol entdeckt: Die **Erdung** oder den **Schutzleiter**.

Was hat es damit auf sich?

Bisher haben wir als Quellen immer drei Spulen gezeichnet. Diese Spulen waren aus dem Modell des Kraftwerkgenerators hervorgegangen.

Nun kommen aber unsere Leitungen nicht direkt aus den Kraftwerken, sondern von so genannten Unterstationen oder Trafostationen. Trafo heisst Transformator, dies ist ein Spannungswandler.



(Transformator für **eine** Phase)

Er wandelt die Hochspannung von den grossen Freileitungen in die Haushaltsspannungen um. In diesen Trafostationen sind auch Spulen vorhanden, nämlich eben die Trafospulen, in denen die Spannungen induziert werden. Der Trafo ist dann eigentlich die Quelle, in der die drei Phasen letztmals "aufbereitet" werden. Im Kraftwerk und hier beim Trafo sind die drei Quellen am Sternpunkt zusammengeschaltet. Der Sternpunkt wird geerdet, elektrisch mit der Erde verbunden.

Das Netz ist am Sternpunkt geerdet.

Das heisst, die Spannungen sind auf das Potential der Erde bezogen.
Die Erde liegt damit auf Potential Null. Die Phasen sind auf 230V Effektivwert gegenüber Erde.

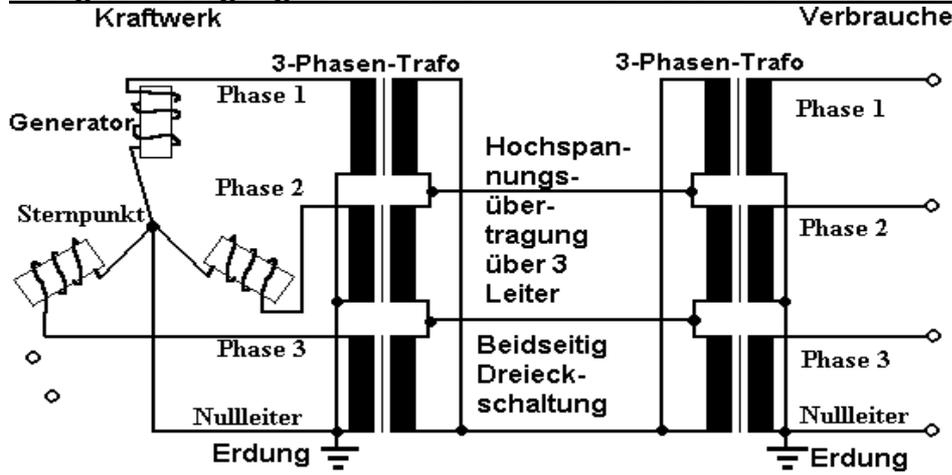
Das Netz könnte theoretisch ebensogut potentialfrei sein, das heisst, nicht auf die Erde bezogen.

Beispielsweise jedes netzunabhängige Gerät ist (erd-)potentialfrei, man sagt auch **floating** (schwimmend). Aus praktischen und Sicherheitsgründen erdet man das Netz aber.

Gründe, warum das Netz geerdet ist:

- Man will ein **definiertes Potential** gegenüber Erde, auf der schliesslich alle Menschen stehen (nicht floating).
- Wenn das Netz floating wäre, könnte es beliebige Potentiale (also Spannungen) gegenüber Erde annehmen, zum Beispiel bei Blitzeinschlag ins Netz. Dies würde zu unvorhersehbaren Ableitungen (Überschlägen) aus dem Netz gegen Erde führen (z.B. Blitze aus der Lampe gegen den Wasserhahn).
- Ableitung gegen Erde sind ohnehin nicht zu vermeiden (Isolationsdefekte, Störfälle).
- Andere Netze (Bahnnetz) könnten im Berührungsfall Gefahren für das öffentliche Netz bedeuten.

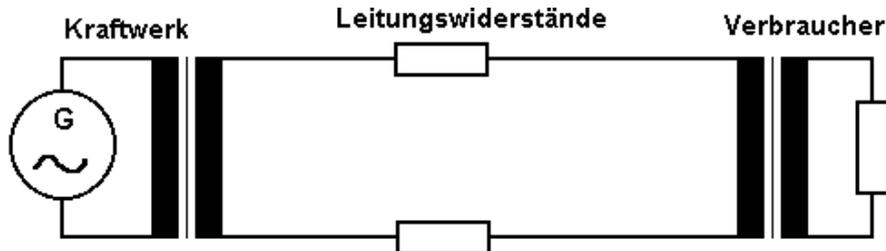
Energieübertragung vom Kraftwerk zum Verbraucher und die Erdungspunkte:



5.8 Wozu Hochspannungsleitungen?

Auf dem vorigen Blatt sehen wir das Prinzip der Energieübertragung über Hochspannungsleitungen.

Hier noch einmal vereinfacht mit nur **einer** Phase, dafür mit den realen Leitungswiderständen.



Die vom Generator abgegebene Spannung wird um ein Vielfaches hochtransformiert, das heisst, auf eine höhere Spannung umgewandelt. Möglichst nahe am Verbraucher erfolgt die Rücktransformation, dies meist in mehreren Stufen.

Aber wozu das Ganze? Warum braucht es Hochspannungsleitungen?

(Die Bezeichnung **Starkstromleitung** ist übrigens hier nicht angebracht, denn auch 230V ist Starkstrom; als Hochspannung gilt jede Spannung über 1000 Volt.)

Der Grund liegt im elektrischen **Widerstand von realen Leitungen** und den dadurch entstehenden **Verlusten**. Die Verluste steigen **quadratisch** mit der geführten Stromstärke!

Man kann anhand selbsterwählter Beispiele verschiedene Fälle durchspielen. Gegeben sei:

- Zu übertragende Leistung: **P = 50MW** (Kleinstadt)
- Distanz: 100km
- Leitungsmaterial: Aluminium

Nun kann man verschiedene Übertragungsspannungen wählen, und über mehrere Schritte grob die dabei auftretende Verlustleistung und weitere interessante Grössen ausrechnen:

Übertragungsspannung (wählen)	Stromstärke $I = P / U$	Minimal nötiger Leitungsdurchmesser , der diesen Strom aushält (1mm ² Querschnittsfläche A pro 10 Ampère)	Widerstand dieser Leitung (beide Leiter zusammen) $R = \rho * 2 * L / A$ (rho = spezifischer Widerstand des Leitungsmaterials)	Verlustleistung über der Leitung $P = R * I^2$
128 kV	319 A	7 mm	71 Ohm	14.5 MW (30%)
230 V	217 kA	16 cm !	0.14 Ohm	6.6 GW !!! ?????????

Wir sehen: Möchte man die 50MW Leistung mit **230V** Spannung über die "dünnst" mögliche Leitung (16cm!) übertragen, ergäbe sich theoretisch eine Verlustleistung, die **über hundert Mal so gross** wäre wie die zu übertragende Leistung. **Fazit: Die Leistung kommt beim Verbraucher gar nie an!** Allzuhohe Spannungen sind wiederum wegen des Isolationsaufwandes nicht vertretbar.

Trotz optimierten Verteilnetzen wird in der Schweiz allein durch die Verluste bei der Energieverteilung **elektrische Leistung** im Umfang eines **grösseren Kernkraftwerks** auf den Leitungen buchstäblich **verheizt!** Eine dezentralere Energieproduktion wäre daher energietechnisch sinnvoller, aber offenbar wirtschaftlich für die Werke nicht tragbar.

Ferner kann man sich fragen, warum diese Leitung meist oberirdisch über gigantische Gittermasten laufen müssen.

Das "Verpacken" von Hochspannungsleitern in Kabel stellt noch heute riesige Anforderungen an die Isolationsmaterialien. Dies ist erstens eine **Preisfrage** und zweitens eine Frage der **Lebensdauer** eines solchen Kabels. Viele der bei uns seltenen Stromausfälle sind auf Isolationsdefekte in unterirdischen Hochspannungskabeln im städtischen Bereich zurückzuführen!

5.9 Unfallverhütung

5.9.1 Beispiele aus dem Alltag

Ein gewisser Umgang mit elektrischem Strom sind uns aus dem Alltag bekannt.

Versuchen Sie, die untenstehenden Punkte in die aufgeführten Kategorien einzuteilen und suchen Sie weitere Beispiele.

Beispiele	tendenz- iell gefähr- lich	eher unge- fähr- lich	kommt drauf an	Kommentar
Eisenbahnschienen berühren				
Barfuss die Haare fönen				
3 elektrische Heizöfen an einer Steckdose anschliessen				
Ein Verlängerungskabel durch eine Wasserpfütze verlegen				
Mit einem Drachen im Bereich einer Freileitung spielen				
Mit einem Gleitschirm in eine Hochspannungslitung fliegen				
In der Badewanne mit Handy telefonieren				
Auf das Dach von abgestellten Eisenbahnwagen klettern.				
Eine Autobatterie berühren				
Eine für Innenräume bestimmte Lichterkette draussen verwenden				
Elektrolyse bei der Aluminiumherstellung: Stromschienen mit ca. 5 V und 10'000 Ampère.				

5.9.2 Grundsätzliches zur Verhütung von Unfällen mit Strom

Worum geht es bei der Unfallverhütung:

1. Schutz von
2. Schutz von
3.

Unfall-Ursachen allgemein formuliert

Gegenmassnahmen

.....
.....
.....

Sachschäden können entstehen durch:

.....
.....
.....

Menschen können zu Schaden durch kommen durch:

.....
.....
.....
.....

Entscheidend für die Auswirkung auf den Menschen ist,

ob die Spannungsquelle in der Lage ist,
.....zu erzeugen.

Dies ist abhängig von

.....
.....
.....
.....
.....
.....

5.9.2 Grundsätzliches zur Verhütung von Unfällen mit Strom

Worum geht es bei der Unfallverhütung:

1. Schutz von Menschenleben.....
2. Schutz von Sachwerten (Gebäuden, Geräten).....
3. Richtiges Verhalten im Fall eines Unfalls.

Unfall-Ursachen allgemein formuliert

Gegenmassnahmen

Menschliches Versagen	Information, Stressabbau
Technisches Versagen	Qualitätskontrolle, Wartung
Umwelteinflüsse (Blitz, Unwetter) (Blitzableiter)	Schutzmassnahmen

Sachschäden können entstehen durch:

Überlastung, Kurzschluss, Manipulation -> Funkenwurf, Glühen -> Brand
Isolationsdefekt -> Kriechströme / Fehlerströme -> Brand
Blitzeinschlag, auch kleine ESD=elektrostatische Entladung (**D**ischarge)

Menschen können zu Schaden durch kommen durch:

Direkte Elektrisierung: Stromfluss durch den Körper
(Herzbeeinträchtigung).
Verbrennungen durch Lichtbogen oder Flammbogen (bei Hochspannung)
Sekundärünfälle durch Reflexwirkungen, Muskelzuckungen -> Sturz von
der Leiter

Entscheidend für die Auswirkung auf den Menschen ist,

ob die Spannungsquelle in der Lage ist, im Körper des Menschen einen gefährlichen Strom (Ampère) zu erzeugen.

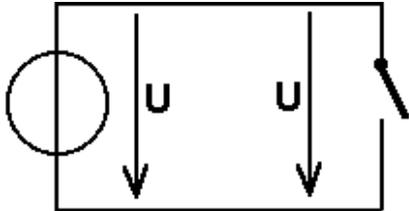
Dies ist abhängig von

- Zeitdauer der Stromeinwirkung.
- Höhe der Spannung
- Körperwiderstand (Feuchtigkeit der Haut)
- Stromweg durch den Körper (Berührungsart)
- Standort (Isolation gegen die Erde? Erdkontakt= gefährlicher)

- Stromart (Frequenz), Innenwiderstand der Spannungsquelle

5.9.3 Kurzschluss, Überlast, Sicherungen

Ein Kurzschluss ist eine direkte elektrische Verbindung der Anschlüsse eines Elements. In der Energietechnik meint man damit die direkte Verbindung der beiden Pole einer Quelle.



Beispiel: Man sagt, das Schliessen des Schalters bewirkt einen Kurzschluss der Quelle. (Oder einen Kurzschluss **über** der Quelle.)

Zur Erinnerung: gezeichnete Leitungen werden als ideal angenommen (Widerstand = null Ohm)

Merkmale eines Kurzschlusses:

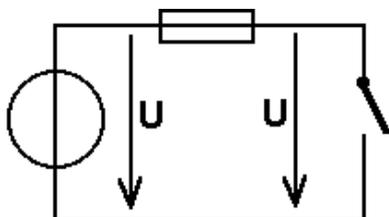
- Die Spannung über einem idealen Kurzschluss ist null, in der Realität annähernd null.
- In den Leitungen fliesst theoretisch - **nur** theoretisch - ein unendlich hoher Strom.
- In der Realität ist er natürlich nicht unendlich, sondern der **Kurzschlussstrom** ist durch den gesamten Widerstand im kurzgeschlossenen Stromkreis begrenzt.
Gesamtwiderstand = Innenwiderstand der Quelle + Leitungswiderstände.

Mögliche Folgen des Kurzschlusses:

- Der Kurzschluss führt zur Zerstörung der Quelle oder der Leitungen durch Überhitzung.

Schutzmassnahme zur Abwendung der Folgen eines Kurzschlusses:

- Sicherung (oder sogenannter Leitungsschutzschalter) in den Stromkreis einbauen!



Die Sicherung wird **seriell** in den zu schützenden Stromkreis eingebaut

Die Darstellung der Sicherung ist meist ein Widerstand mit einem Strich durch die Mitte Schmelzsicherung

f

Die Überlast

Die Überlast ist quasi die Vorstufe eines Kurzschlusses.

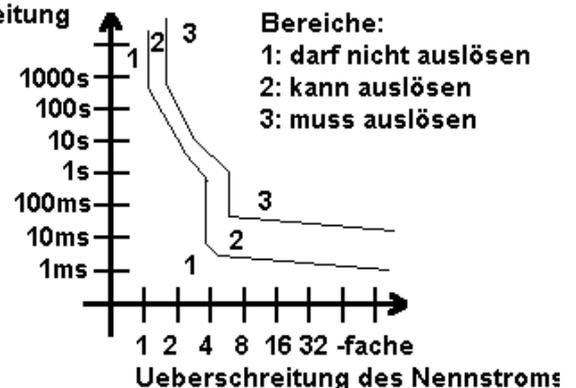
Überlast heisst, dass ein Strom durch Leitungen oder Anlagen fliesst, der zu gross ist.

Schmelzsicherungen und Leitungsschutzschalter lösen nicht nur bei Kurzschluss aus, sondern **auch bei Überlast**, das heisst, bei zuviel Strom.

Die Auslösezeit ist abhängig von der **Höhe der Überschreitung** des Nennstromes, für den die Sicherung gebaut ist.

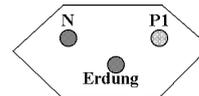
Sicherungen haben eine sogenannte Auslösekennlinie:

Dauer der Ueberschreitung



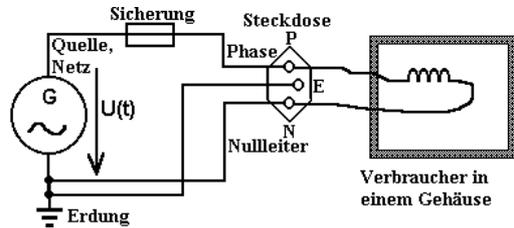
5.9.4 Erdung von Geräten

In Kap 5.6 haben wir gesehen, dass die meisten **Steckdosen** mindestens drei Pole haben. Für einen Stromkreis wären ja nur zwei notwendig. Der dritte ist die Erdung oder der Schutzkontakt.



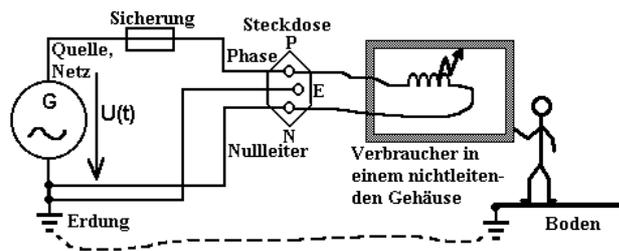
In Kap 5.7 haben wir festgestellt, warum das **Netz** geerdet ist.

Nun haben ja auch viele **Geräte** drei Steckerstifte, haben also offenbar einen Erdleiter. Warum?

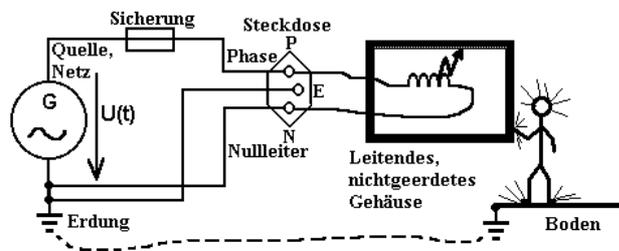


Links ist das vereinfachte Bild eines Netzstromkreises für **eine Phase**:

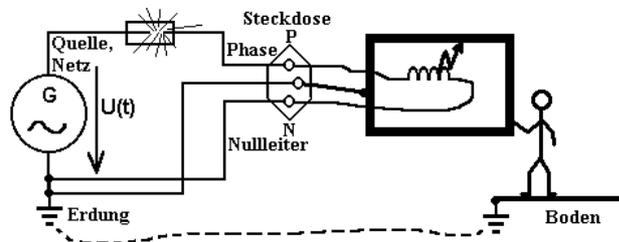
Der eine Pol des Netzes ist geerdet. Von dort führen Nullleiter und Erdleiter zur Steckdose. Der andere Pol ist die Phase. Sie führt über die Sicherung zur Steckdose und schliesslich zu den Verbrauchern.



Nun tritt ein Schaden am Gerät auf, so dass die Phase von innen das Gehäuse berührt. Wenn das **Gehäuse isolierend** ist, z.B. aus Kunststoff ist, so ist eine Berührung des Geräts



Wenn das **Gehäuse leitend** ist, z.B. ein Metallgehäuse, das **nicht geerdet** ist, so ist eine Berührung des Geräts



Nur ein vorgeschalteter Fehlerstrom-Schutzschalter kann die tödliche Gefahr abwenden (Kap 5.9.6)

Wenn das Gerät im Metallgehäuse vorschriftsgemäss geerdet ist, ist das Berühren des Gehäuses auch bei Defekt

Das Gehäuse liegt eben unabhängig vom Defekt immer auf dem ungefährlichen Potential des Nullleiters und der Erde. Falls der Defekt am Eingang der Phase ins Gehäuse liegt (nur dann), gibt es einen Kurzschluss, womit die Sicherung den Stromkreis unterbricht.

Jedes Gerät mit Metallgehäuse oder exponierten Metallteilen muss geerdet sein!
 Das Unterbrechen des Erdleiters kann lebensgefährlich sein!
 Die Farbe des Erdleiters ist international genormt: **gelb-grün**

Farbcodes für Drähte und Kabel für 230-V-Installationen:

Phasen (Berührung gefährlich)	Nullleiter (ungefährlich)	Erdung (ungefährlich)
schwarz, rot, weiss braun (meist nur in Kabeln)	hellblau gelb (frühere Farbe in alten Installationen)	gelb-grün

5.9.5 Kontaktfehler

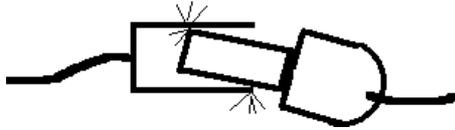
Jeder Leiter hält nur eine bestimmte **Stromdichte J** aus. Die Stromdichte bestimmt die Erwärmung des Leiters.

Die **Stromdichte J** ist definiert als **Stromstärke I** bezogen auf die **Querschnittsfläche A** des Leiters:

$J = I / A$	Stromdichte = Stromstärke durch Querschnittsfläche Ampère/mm ²	Einheit:
-------------	--	----------

Für 10 A sind 1,5 mm² vorgeschrieben.

Vor allem bei Steckkontakten kann es vorkommen, dass die Kontaktfläche wesentlich kleiner ist. In diesen Kontaktflächen ist die Stromdichte bei gleichbleibendem Strom demzufolge wesentlich grösser.



Beispiele sind schlechtsitzende zusammengesteckte Verlängerungskabel, schwach eingeschraubte Sicherungen, schwach angezogene Schrauben in Steckern, mechanisch belastete Doppelstecker und ähnliches. ->**Wackelkontakte**

Dies kann zu starker, lokal begrenzter Erwärmung führen, im dümmsten Fall entsteht daraus ein Brand. Direkte Gefahr für Menschen besteht hingegen keine.

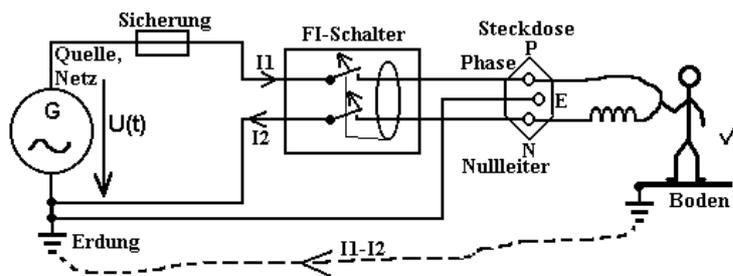
5.9.6 Isolationsdefekt, Fehlerstrom

Isolationsdefekte wie in Kap 5.9.4 beschrieben können in einem Gerät oder an jeder Stelle des Kabels oder Stromkreises auftreten. Wenn sie ausserhalb des geerdeten Gehäuses auftreten, so schützt die Erdung des Geräts natürlich **nicht** vor Elektrisierung.

Wenn von der Stelle des Isolationsdefekts eine Verbindung zur Erde zustande kommt, so verlässt ein Teil des Stroms den vorgesehenen Stromkreis und fliesst via Erde zurück zum Nullleiter-Pol der Quelle (genauer: zum Sternpunkt der Trafostation). Dies ist ein Kriechstrom oder **Fehlerstrom**, er fehlt im normalen Stromkreis. Er kann **Menschen und Sachen** schädigen!

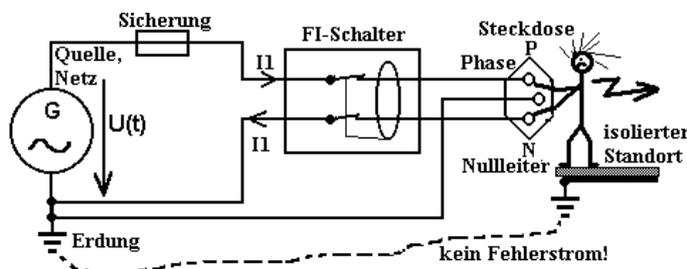
Das ist wie wenn bei einer Zentralheizung ein Radiator Wasser verliert.

Abhilfe schafft der **Fehlerstrom-Schutzschalter (kurz FI-Schalter)**:



Der FI-Schalter ist in Serie in die Hin- und Rückleitung der Verbraucher geschaltet. Er überwacht, ob in beiden Leitern gleichviel Strom fliesst. Wenn dies nicht der Fall ist und die Differenz der beiden Ströme den Nenn-Auslösewert erreicht, trennt der FI-Schalter innerhalb von Sekundenbruchteilen die Verbraucher vom Netz. Man spürt allerdings eine kurze **ungefährliche** Elektrisierung.

Für Steckdosen im Freien oder in Badezimmern sind FI-Schalter vorgeschrieben.
Ein FI-Schalter **schützt nicht** bei **erdfreiem, zweipoligem Berühren!**



Da der Mensch hier isoliert ist gegen Erde, findet eine **sehr gefährliche Elektrisierung** statt!

Der FI-Schalter misst in Hin- und Rückleitung den gleichen Strom und schaltet **nicht** ab.

Nur wenn der Mensch einen Fehlerstrom gegen Erde "durchlässt", schaltet der FI-Schalter ab.

5.9.7 Die Elektrisierung

Die Stärke der Elektrisierung (Schmerz, Verwundbarkeit, Todesgefahr) ist grundsätzlich von der **durch den Körper fliessenden Stromstärke und von der Zeit abhängig**.

Die **direkten** Auswirkungen des Stroms sind die folgenden:

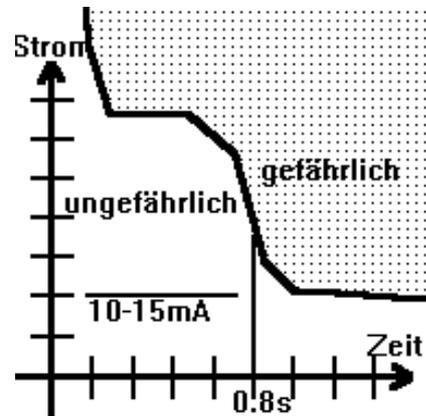
Stromstärke	Auswirkung
50 μ A (=0.05 mA)	schwaches Kribbeln, wahrnehmbar z.B mit der Zunge an einer Batterie
1 mA	Kribbeln, mit den Fingern wahrnehmbar
1 - 15 mA	zunehmendes Kribbeln, dann beginnender Muskelkrampf

15 - 20 mA	Loslassgrenze , Muskelkrampf so stark, dass man einen umfassten Leiter nicht mehr loslassen kann
20 - 50 mA	zunehmender Muskelkrampf bis zum Atemstillstand, Ersticken
über 50 mA	Herzkammerflimmern nach wenigen Sekunden, Herzstillstand
hohe Ströme	zusätzlich Verbrennungen

Diese Werte sind nur ungefähre Werte. Sie werden beeinflusst durch die körperliche Konstitution sowie durch den **Stromweg** durch den Körper. Ein Strom durch die Herzgegend (z.B. von Hand zu Hand oder von Hand zu den Füßen) ist gefährlicher als ein Strom, der nur durch einen Finger fließt.

Die gefährliche Grenze ist ca. bei **15mA**:

- Unter 15mA ist in der Regel nicht mit unmittelbaren Schäden zu rechnen.
- Über 15mA kann nur durch **Begrenzung der Einwirkdauer** die Gefahr abgewendet werden, z.B. durch sofortige Abschaltung (0.2s) durch einen FI-Schalter oder je nach Grösse des Stroms **vor Ablauf einer Herzperiode (ca. 0.8s)**. Bei sehr kurzer Einwirkzeit können auch höhere Ströme ohne direkte Gefährdung bleiben (kurzer Elektroschock, Herztherapie).



Die Höhe des Elektrisierungsstromes ist nach dem Ohmschen Gesetz abhängig von der **Spannung während der Berührung** (Berührungsspannung) am Berührungspunkt und dem **Gesamtwiderstand** zwischen dem Berührungspunkt und dem Sternpunkt der Stromversorgung.

Er lässt sich ausrechnen mit:

$$I = \frac{U}{R}$$

Der **Gesamtwiderstand** ist der Körperwiderstand plus ein allfälliger Erdungswiderstand (Kleider, Boden, Gebäude, Leitungen).

Die **Spannungswerte** können in folgende Gruppen eingeteilt werden:

Spannung	Bezeichnung	Eigenschaft
über 1000 V	Hochspannung, Starkstrom	sehr gefährlich (fast in jedem Fall)
50 - 1000 V	Niederspannung, Starkstrom	grundsätzlich als gefährlich anzusehen
unter 50 V	Kleinspannung (Schwachstrom)	in der Regel ungefährlich

Zu erwähnen sind die **indirekten** Folgen einer Elektrisierung:

Auch bei schwachen oder kurzen Elektrisierungen erschrickt man mehr oder weniger. Dies führt fast ausnahmslos zu Muskelzuckungen und kann je nach Standort in einem Sekundärnfall enden, wie z.B. Sturz von einer Leiter.