

Sichere Stromversorgung mit Wind und Sonne?

Ein Versuch, die technischen Risiken verständlich zu machen

von **Theodor O. Blum**

Lektorat: Christine Blum

Um die komplexen technischen Zusammenhänge der Stromerzeugung zu verstehen, ist ein Fachwissen nötig, das weit über den Physikunterricht in der Schule hinausgeht. Dies erschwert die Aufklärung über die technischen Probleme der heutigen Stromwirtschaft, die im öffentlichen Diskurs ohnehin so gut wie nicht thematisiert werden, vielleicht auch aufgrund einer allzu positiven Einstellung der Bevölkerung den erneuerbaren Energien gegenüber.

Dieses Dokument soll dazu beitragen, in bewusst einfachen Worten, ohne viele Fachbegriffe und Formeln, dem Laien Einblick in die Problematik zu verschaffen. Mit Absicht wurden Verweise und Details auf ein Minimum reduziert. Um sich tiefer mit der Materie zu beschäftigen, sollten Leser je nach Schwerpunkt des Interesses möglichst breit gefächerte Quellen im Internet sowie Fachliteratur hinzuziehen.

Meine eigenen Kenntnisse gründen auf jahrzehntelange Berufserfahrung als Elektromeister in verschiedensten Bereichen dieses Berufsfelds, auf private ständige Weiterbildung sowie auf Recherchen, u. a. vor Ort in diversen Kraftwerkstypen.

1. Technische Probleme der erneuerbaren Stromerzeuger im öffentlichen Stromnetz

1.1. Aufrechterhaltung der nötigen Strommenge im Netz

Die Stromversorgung ist für die meisten Leute ein Buch mit sieben Siegeln. Ihnen ist nicht bewusst, dass die Energieversorgungsunternehmen zu jedem gegebenen Moment nur genau die Energiemenge ins öffentliche Stromnetz einspeisen dürfen, die für den Betrieb der augenblicklich eingeschalteten Geräte und Maschinen notwendig ist. Wann die Stromkunden welche Lastgrößen ein- und ausschalten, ist kaum beeinflussbar. Die Stromversorger müssen deshalb streng darauf achten, dass die elektrische Spannung präzise eingehalten wird. Geringste Abweichungen von der Netzfrequenz müssen sofort korrigiert werden, indem die eingespeiste Strommenge erhöht oder reduziert wird. Dabei müssen die Stromversorger jederzeit ausreichend Kraftwerksleistung zur Verfügung halten, um, falls nötig, die zu erwartende Maximalleistung gewähren zu können.

Mit den konventionellen "alten" Kraftwerken und deren sicher verfügbaren Antriebsenergien war das gut zu beherrschen. Doch diese Balance wird seit nahezu 40 Jahren zunehmend empfindlich gestört durch unstete, nicht steuerbare Stromerzeuger wie Windkraftanlagen, Photovoltaik und tausende dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung-Minikraftwerke (KWK). Sie alle erzeugen ihren Strom mit erneuerbarer Energie – eine Tatsache, die vom Großteil der Bevölkerung mit unkritischem Idealismus gutgeheißen wird. Nur: Die Antriebsenergie der sogenannten alternativen Stromerzeuger ist höchst unzuverlässig. Obwohl ihre theoretische Dauer-Spitzenleistung (Nennleistung) bereits über den benötigten Strombedarf in Deutschland hinausgeht, schwankt die tatsächliche Stromerzeugung laufend zwischen 0% und 100%, je nach Wind- und Sonnenverhältnissen sowie dem Wärmebedarf für KWK. Im Jahresmittel wird so nur ca. 10% der Nennleistung erzeugt; kurzfristig hingegen werden bei geringer Netzbelastung und „guten“ Witterungsbedingungen Leistungsspitzen von weit über 100% des augenblicklichen Strombedarfs erreicht.

Zusätzlich zum kaum voraussehbaren Verhalten der Stromkunden müssen die konventionellen Kraftwerke nun also auch die nicht planbare Zufallsstrom-Einspeisung der alternativen Stromerzeuger ausgleichen. Da diese laut EEG Einspeisevorrang in die Versorgungsnetze haben, muss bei o.g. Leistungsspitzen die Leistung der konventionellen Kraftwerke gegen Null gedrosselt werden – selbst die

der eigentlich ebenfalls „erneuerbaren“ Laufwasserkraftwerke, bei denen dann zwangsläufig bis zu 40% der Wassermenge ungenutzt an den Turbinen vorbeigeleitet wird. Gleichzeitig jedoch muss die zuverlässige konventionelle Leistungskapazität permanent betriebsbereit sein, um plötzliche Leistungsrückgänge der Alternativen auszugleichen¹.

Aus dieser notwendigen Balance wird verständlich, dass insbesondere durch Wind- und Sonnenenergie keine Reduzierung oder Energieeinsparung der konventionellen Kraftwerke möglich ist. Es müssen sogar zusätzlich konventionelle Kraftwerke mit besonders schneller Betriebsbereitschaft gebaut werden (Gas- und Dampfkraftwerke; besonders letztere müssen die meiste Zeit im unwirtschaftlichen Teillastbereich arbeiten). Auch wird auf diese Weise sicherlich nie eine Unabhängigkeit von Stromimporten aus Nachbarländern möglich sein, in denen Kohle- und Kernkraftwerke weiter betrieben und auch neu gebaut werden.

1.2. Inkompatible Formen des erzeugten Stroms

Die deutschen Fachverbände der Elektrotechnik nehmen leichtfertig in Kauf, dass der jetzt bestehende „Energimix“ im deutschen Stromnetz aus drei völlig unterschiedlichen Wechselstromenergien besteht, die auf unterschiedliche Art erzeugt werden und entsprechend unterschiedlichen Charakter haben. (Kapitel 3 umfasst eine detailliertere Betrachtung der Konsequenzen dieser Mischung.)

1.2.1. Die drei Grundtypen der heute eingesetzten Generatoren

a) Synchrongeneratoren

Dies sind die Generatoren der konventionellen Großkraftwerke mit zuverlässigen, gut steuerbaren Antriebsenergien (z. B. Kernkraft, Laufwasser, Kohle). Der erzeugte Strom hat harmonische sinusförmige Wechselstromfrequenz, die ohne weiteren Aufwand mit der Netzfrequenz synchron ist.

Der Wikipedia-Artikel zur Drehstrom-Synchronmaschine², der für Laien sicherlich eine wichtige Referenz darstellt, ist sachlich korrekt.

Bei Windkraftanlagen mit „*fremderregtem*“ Synchrongenerator hingegen handelt es sich nicht um klassische Synchronmaschinen, sondern letztlich um Gleichstromerzeuger mit Wechselrichter (s. dort). Bei Wikipedia³ wird diese Technik beschrieben, deren Netzverträglichkeit jedoch beschönigt.

b) Asynchrongeneratoren

Solche Generatoren werden wegen ihrer einfachen Bauart und Regelungstechnik gern in kleinen Kraftwerken wie Windkraft- oder Biogasanlagen eingesetzt⁴. Ihr Läufer muss allerdings immer schneller drehen als die Synchrondrehzahl (dies nennt man „positiven Schlupf“)⁵. Deshalb erzeugen sie Wechselstrom mit grundsätzlich höherer Frequenz als der Netzfrequenz, die sich von Generator zu Generator unterscheidet und bei Belastungsänderungen zudem Schwankungen unterworfen ist. Im „Rohzustand“ ist dieser Strom nicht mit dem Netzstrom kompatibel. Man benötigt komplexe Zwischentechnik (Umrichterkopplung, Frequenzüberwachung, Kompensationsanlagen), um ihn einigermaßen ins Netz einspeisbar zu machen. Doch trotz all dieser Maßnahmen kann seine instabile Natur nicht vollständig kompensiert werden und wirkt sich zwangsläufig nachteilig auf die Stromqualität aus. Der Wikipedia-Artikel⁶ schildert korrekt diese Technik sowie die nötigen Kompensationsmaßnahmen.

¹ insbesondere bei unregelmäßiger Windstärke oder Sonneneinstrahlung mit ziehenden Wolken

² <https://de.wikipedia.org/wiki/Drehstrom-Synchronmaschine> (abgerufen am 23.01.2017)

³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage#Synchrongenerator> (abgerufen am 25.01.2017)

⁴ Die Entwicklung geht dahin, dass in kleinen Wasserkraftwerken (z.B. Linachtalsperre) der alte Synchrongenerator verschrottet wird, weil ein neuer Asynchrongenerator billiger ist als eine Reparatur – in Absprache und Planung mit dem zuständigen Netzbetreiber Badenova (festgestellt beim persönlichen Besuch 2004).

⁵ Nur bei positivem Schlupf erzeugt der Generator Strom; ein „negativer Schlupf“ würde bedeuten, dass er zum Motor wird.

⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Asynchrongenerator> (abgerufen am 23.01.2017)

c) Gleichstromerzeuger mit Wechselrichter

Unter den alternativen Stromerzeugern sind dies insbesondere die Solarzellen⁷. Die Umwandlung ihrer Gleichstromenergie in Wechselstrom geschieht durch Wechselrichter. Diese formen Wechselstrom mit rechteckförmiger Sinusschwingung, im Gegensatz zu Generatoren mit sich drehendem Läufer. Bei allem Bemühen ist es bisher nicht gelungen, eine Technik zu finden, mit der statische Wechselrichter Wechselstrom mit harmonischer Sinusschwingung formen können.

Die Frequenz des so generierten Wechselstroms wird vom Netzstrom bestimmt, an dem sich die Wechselrichter sozusagen orientieren. Im Normalfall ist das sinnvoll; ein großes Risiko dieser Tatsache wird jedoch in Abschnitt 1.3.3 erläutert.

1.2.2. Konsequenzen der Mischung der drei Stromtypen

Nur die Synchrongeneratoren der "alten" Kraftwerke mit ihrer sinusförmigen, gut steuerbaren Wechselstromfrequenz können in beliebiger Anzahl und Leistung verlust- und störungsfrei ins öffentliche Stromnetz einspeisen. Ihre Einzelleistungen summieren sich nahtlos auf und gewähren durch ihre Regelmäßigkeit die Netzstabilität.

Trotz aller Angleichungsmaßnahmen sind die beiden übrigen erzeugten Wechselstromarten mit ihrer erratischen Frequenz bzw. ungünstigen Sinusform unverträglich sowohl zu diesen als auch zueinander. Veranschaulichend ist es, als ob Schallwellen unterschiedlicher Tonhöhen (von denen eine sich zudem ständig ändert) in einem Kanal gemischt werden mit dem Wunsch, sie mögen zum Schluss dieselbe Höhe haben.

Beim elektrischen Strom können sich abweichende Sinuskurvenverläufe im Netz zwar stabilisieren. Dazu ist jedoch immer eine gewisse Menge sauberer, stabiler Basisenergie vonnöten – etwa zwei Drittel der gesamten Netzenergie. Hier aber verbergen sich in der derzeitigen Stromversorgungssituation Probleme, die der Öffentlichkeit völlig unbekannt sind:

- Um die unregelmäßigen Stromerzeuger auch unter besten Bedingungen ins Stromnetz zu integrieren, ist ein hoher Energieaufwand erforderlich, der die tatsächliche Nutzleistung gegenüber der erzeugten Gesamtleistung deutlich schmälert⁸. Diese „Blindleistung“ kann bei ungünstigen Frequenzen der Asynchrongeneratoren nahezu 100% der Gesamtleistung im Netz betragen. Die „Wirkleistung“, die dem Verbraucher zur Verfügung steht, geht dann gegen Null. Die verlorene Energie wandelt sich in Wärme und – insbesondere beim „Glätten“ der rechteckförmigen Sinuskurve der Wechselrichter – in **Oberschwingungen** (s.u.) um.
- Die Energiemenge im öffentlichen Netz wird von Verbraucherseite bestimmt. Da laut EEG die alternativen Stromerzeuger Einspeisungsvorrang haben, kommt es bei geringem Stromverbrauch, aber günstigen Bedingungen für die regenerativen Stromerzeuger (z. B. an sonnigen, windigen Wochenenden, an denen kaum gewerblicher Strombedarf herrscht), regelmäßig zu Situationen, in denen zu wenig stabile Basisenergie vorhanden ist, um die Unregelmäßigkeiten der alternativen Einspeisungen zu glätten. Diese Netzinstabilität führt verstärkt zu den bereits erwähnten Oberschwingungen.

1.3. Gefahren des instabilen Stromnetzes

1.3.1. Oberschwingungen

Oberschwingungen, sog. Harmonische, haben Frequenzen des ganzzahlig Vielfachen der Netzfrequenz. Sie entstehen nicht nur durch unregelmäßige Energieerzeuger, sondern auch durch Verbraucher, die dem Netz einen nicht sinusförmigen Strom entnehmen. Oberschwingungen im Stromnetz sind eine Gefahr für alle Verbraucher, insbesondere für empfindliche elektronische Geräte und Steue-

⁷ Außer Solarzellen gehören hierzu auch z. B. Brennstoffzellen (Wasserstofftechnik) und Batterien.

⁸ Die rein rechnerische Summe des erzeugten Stroms ist eine Scheinleistung. Siehe auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Blindleistung>.

rungen. Deren Schwingkreise⁹ besitzen eine Eigenfrequenz, die von einer Oberschwingung mit dazu passender Frequenz und genügend großer Amplitude angeregt werden kann, sofern diese lange genug besteht. Ist dies auch nur für den Bruchteil einer Sekunde der Fall, so gerät der Schwingkreis in Resonanz. Das bedeutet, er beginnt selbst mitzuschwingen, und verstärkt das Geschehen dadurch um ein Vielfaches. Auf der Leitungsstrecke zwischen Kondensator und Spule des Schwingkreises entsteht binnen Millisekunden entweder eine sehr hohe Spannung (bei Parallelschwingkreisen) oder ein massiver Stromfluss (bei Reihenschwingkreisen). Die entstehende Energie muss sich, wie ein Blitz bei Gewitter, einen Ausweg suchen, was im harmlosesten Fall zum Unterbrechen der Sicherung führt, ansonsten zum Kurzschluss (beim Parallelschwingkreis) bzw. zum Durchschmelzen der schwächsten Stelle der Leitungsstrecke¹⁰ (beim Reihenschwingkreis). Mit anderen Worten, solche „Resonanzfälle“ verursachen oft irreparable Schäden.

Die Entstehung solcher „passender“ Oberschwingungen ist überall und jederzeit möglich. Sie ist weder voraussehbar noch zu verhindern, noch ist im Nachhinein rekonstruierbar, ob ein Schaden an einem Gerät durch ein solches Ereignis verursacht wurde¹¹.

1.3.2. Verhinderung von Oberschwingungen: nur lokal möglich

Natürlich ist unter Fachleuten bekannt, welche Gefahr Oberschwingungen darstellen. Längst gibt es für große, den Netzstrom beeinflussende *Verbraucher* Maßnahmen, um die Entwicklung von Oberschwingungen auf lokaler Ebene zu dämpfen. Auch zur Bekämpfung von Oberschwingungen durch regenerative Energieerzeuger gibt es von staatlicher Seite Bemühungen; bisher stecken diese jedoch noch in den Anfängen¹², und selbst bei (zum momentanen Kenntnisstand der Wissenschaft fraglichen) Erfolgen wäre bei der unübersichtlichen Anzahl und Wirkweise der installierten Anlagen eine Nachrüstung auf Netzverträglichkeit ein kaum stemmbarer finanzieller und bürokratischer Aufwand.

Daher sind Oberschwingungen, verursacht durch disharmonische Wechselstromenergien, ein nicht einzudämmendes Übel, das in immer höherem Maß das Stromnetz belastet. Dies gilt nicht nur für Deutschland, sondern durch die Vernetzung der europäischen Stromanbieter auch für die Netze anderer Länder. Eine unschätzbare Zahl wirtschaftlich durchaus relevanter Schäden an elektrischen und elektronischen Einrichtungen sind die Folge, bis hin zum möglichen Schreckensszenario eines flächendeckenden Stromausfalls¹³, wie im folgenden Absatz erläutert wird.

1.3.3. Mögliche Eskalation der Oberschwingungsdynamik durch Asynchrongeneratoren und Wechselrichter

Da kein Asynchrongenerator auf Dauer synchron zu irgendeinem anderen und schon gar nicht zur Netzfrequenz läuft¹⁴, kommt es wie in jedem Chaossystem zwangsläufig zu kurzzeitigen Synchronläufen vieler Asynchrongeneratoren, die nicht der Netzfrequenz entsprechen. Die in diesem Moment erzeugte Blindleistung kann je nach Menge der beteiligten Asynchrongeneratoren unvorstellbar hoch sein. Sie belastet das Netz nicht nur mit massiver Wärmeenergie, sondern generiert sehr energiereiche Oberschwingungen bis in höchste Frequenzbereiche.

⁹ Ein Schwingkreis besteht aus einem Kondensator (Kapazität) und einer Spule (Induktivität) die elektrisch miteinander verbunden sind. Solche Anordnungen gibt es millionenfach im gesamten Leitungsnetz, in Gebäudeinstallationen und besonders häufig in elektronischen Steuerungen von Maschinen und Geräten.

¹⁰ Klemmverbindungen, Muffen u.ä.

¹¹ Eine Möglichkeit, einen statistischen Zusammenhang herzustellen, wäre die Einordnung von Schadensereignissen nach Wochentagen, Uhrzeit und Wetterlage (sie also in Bezug zum vermutlichen Anteil alternativer Stromerzeuger am Netzstrom zu bringen).

¹² <http://forschung-stromnetze.info/projekte/oberschwingungen-im-netz-erkennen/>

¹³ Für den Stromausfall am Morgen des 17.01.2017 in Amsterdam, dessen Grund am 23.01. noch immer unbekannt war (<https://data-economy.com/deadly-amsterdam-power-outage-knocks-data-centres/>) könnte dies gelten, ebenso wie für viele Stromausfälle der letzten Jahre, deren Ursache mit „Kurzschluss“ oder „Erdschluss“ angegeben wird. Wie gesagt, ist leider nicht sicher nachweisbar, dass sie der miserablen Netzqualität geschuldet sind.

¹⁴ aufgrund des individuell unterschiedlichen Schlupfs sowie der variablen Spannungspotenziale der Netzeinspeisungspunkte, die mit der Netzbelastung variieren.

Bei weiter zunehmendem Anteil von Gleichstromerzeugern mit netzgeführten Wechselrichtern ist zu bedenken, dass diese sich an der Netzfrequenz orientieren (s. 1.2 c). Wird die Netzfrequenz aber von einer Oberschwingung dominiert, so entsteht ein Teufelskreis in verheerendem Maßstab, mit der Gefahr, dass auch massive Schäden im Hochspannungsnetz entstehen, woraus weit größere und länger andauernde Stromausfälle resultieren würden als bisher geschehen.

2. Die Wahrnehmung der Netzqualität in der Öffentlichkeit

2.1. Fehlendes Bewusstsein für die wirtschaftlichen Folgen der Netzverunreinigung

Im Internet gibt es eine Fülle von Material zu von *Verbrauchern* verursachten Oberschwingungen, selbst solchen mit verschwindend geringer Leistung¹⁵. Das gigantische disharmonische Potential der regenerativen *Energiequellen* hingegen wird so gut wie nicht erwähnt. So ahnt die breite Öffentlichkeit nicht, welche Folgen deren regel- und zügellose Einspeisung ins Netz in einer Größenordnung von inzwischen über 80 GW hat (mehr als der maximale Strombedarf in Deutschland). Leider gibt es aufgrund der mangelnden Rückverfolgbarkeit von Resonanzfällen bisher keine Möglichkeit, zu beweisen, wie viele der zahlreichen Geräteschädigungen, kleineren und größeren Stromausfälle, Brände und ähnlicher Zwischenfälle bundesweit auf die Netzverschmutzung durch alternative Stromerzeuger mit ihren Asynchron- und Gleichstrom/Wechselrichter-Generatoren verursacht werden. Könnte man es z. B. statistisch beweisen, so würde sicherlich klar, dass die angeblich kostenlose Wind- und Sonnenenergie bis heute mehr gekostet hat (einige Billionen Euro), als die Meisten sich vorstellen können, und dass die stetig steigenden Strompreise nur einen kleinen Teil der wahren Kosten widerspiegeln¹⁶.

2.2. Die Frage nach politischer Über-Correctness und gewinnorientierten Erwägungen im Zusammenhang mit der mangelnden Informationslage

Der erstaunliche Mangel an Informationen über die zerstörerische Wirkung erneuerbarer Stromerzeuger muss bei Fachleuten, die der Entwicklung unserer Energiewirtschaft skeptisch gegenüberstehen, zwangsläufig zu Verwunderung führen. Wie bei vielen öffentlichen Diskursen der letzten Jahre und Jahrzehnte ist hier die Frage angebracht, ob dies nicht nur an der Komplexität des Themas liegt, sondern ob dieses von den öffentlichen Organen und den Medien bewusst übergangen wird. Mögliche Gründe sind beispielsweise:

- Zum einen der von ökologisch-romantischen Vorstellungen getragene, jedoch im Grunde unreife Wunsch, die Probleme der alternativen Stromversorgung zu verleugnen, bis sie gelöst sind.
- Andererseits hat die Vorgabe des EEG, regenerative Stromerzeuger massiv im Netz zu bevorzugen und zu subventionieren, wie jede derartige Maßnahme skrupellose Geschäftemacher auf den Plan gerufen, denen natürlich daran gelegen ist, den positiven Ruf erneuerbarer Energie zu erhalten, um sich weiter daran bereichern zu können. Auch sie werden ihren Einfluss geltend machen, um negative Berichterstattung über dieses Thema zu vermeiden.

Im Sinne der aktuell leidenschaftlich geführten Diskussion um die Objektivität von verbreiteten Informationen weltweit wäre es wünschenswert, wenn auch unter Vertretern etablierter Medien die Bereitschaft wachsen würde, sich über dieses Informationsvakuum hinwegzusetzen.

¹⁵ Von Wikipedia abgesehen können beim Suchen von Suchbegriffen wie „Oberschwingungen“ oder „Blindleistung“ zahlreiche Veröffentlichungen von Energieversorgern oder Unternehmen eingesehen werden.

¹⁶ Den weitaus größeren Teil bilden die mittelbar damit zusammenhängenden Kosten wie Reparaturen, Neugeräte, Versicherungsschäden etc.

3. Eingehende Betrachtung von Wechselstromenergien im Hinblick auf die Einspeisung alternativ erzeugter Energien

Die Wechselstromenergie kann im Idealfall mit einem ruhigen Gewässer mit glatter Oberfläche verglichen werden. Anhand der Fließgeschwindigkeit und der Wassermenge pro Zeiteinheit ist der Energieinhalt der Wassermasse leicht zu berechnen. Ähnlich verhalten sich harmonische Wechselstromenergien: Hier sind es die Faktoren Spannung (Fließgeschwindigkeit) und Stromstärke (Wasservolumen), aus denen sich die elektrische Leistung errechnet: $P = U \times I$.

Für das öffentliche Stromnetz sollte idealerweise diese Berechnungsformel gelten können. Nun gleicht aber die Wechselstromenergie im Netz wegen der Einspeisung disharmonischer Energien aus regenerativen Erzeugern einem wild fließenden Gewässer mit vielen störenden Unebenheiten im Flussbett, die unablässig ihre Form ändern. In solchen Fließgewässern gibt es naturgemäß Wirbel und Strudel mit gefährlicher Sogwirkung, deren Auftreten und Energieinhalt weder voraussehbar noch berechenbar ist. Hiermit sind die zerstörerischen Resonanzen aufgrund energiereicher Oberschwingungen gleichzusetzen.

So ist, wie bereits erwähnt, die absolute elektrische Leistung im Netz „Spannung mal Stromstärke“ nur als *Scheinleistung* zu sehen. Um die *Wirkleistung* zu errechnen, die den Verbrauchern tatsächlich zur Verfügung steht, muss ein zusätzlicher Faktor berücksichtigt werden: der Winkelgrad einer Phasenverschiebung $\cos\phi$. Dies ist der Grad, in dem die Frequenzen unterschiedlicher Wechselstromenergien im Netz voneinander abweichen.

3.1. Erläuterungen zur Funktionsweise der verschiedenen Generatoren

a) Synchron- und Asynchrongeneratoren:

Vereinfachte Grundform: Ein Magnetstab, auf einer Welle drehend, wird mit seinem Nordpol an einer Spule vorbeigeführt. Dadurch wird in dieser ein Elektronenfluss induziert, der während einer halben Drehung (180°) von Null bis zum Maximum (Amplitude) ansteigt und wieder auf Null abfällt (positive Halbwelle). Bei der zweiten halben Drehung geschieht der gleiche Vorgang mit dem Südpol des Magnetstabs, es erfolgt eine negative Halbwelle. Im Augenblick des Austretens des S-Pols und Wiedereintretens des N-Pols wird kein Strom induziert (Nulldurchgang).

Dreht der Magnetstab mit kontinuierlicher Drehzahl, so werden in der Spule fortwährend Elektronen bewegt – abwechselnd in die eine und in die andere Richtung. Die Gesamtheit aus positiver und negativer Halbwelle ist die harmonisch an- und abschwellende Sinusschwingung. Der Rhythmus, in dem ein Gesamtumlauf stattfindet, ist die Frequenz.

Die Größe der Energie wird durch die Amplitude ausgedrückt. Je größer die Amplitude, desto größer der Energieinhalt.

aa) Unterschied von Synchron- und Asynchrongeneratoren:

Die wichtigste Frage für die öffentliche Stromversorgung besteht darin, wie gut die Energien von Synchron- und Asynchrongeneratoren miteinander kombinierbar sind.

Nur die Energien aus Synchrongeneratoren, die im Gleichklang miteinander rotieren, addieren sich sauber auf (s. Beispiel 1 unten). Bei Asynchrongeneratoren muss die Phasenverschiebung beachtet werden: Durch die Tatsache, dass sie sich individuell drehen, ergeben sich höhere Frequenzen als die der Synchrongeneratoren. Bei einer Addition müssen zu jedem Zeitpunkt diejenigen Bereiche der Sinuskurven, die gerade unterschiedliche Vorzeichen aufweisen, voneinander abgezogen werden.

b) Gleichstromerzeuger mit Wechselrichter:

Ein Gleichstromerzeuger generiert Gleichstrom mit unveränderlich denselben Vorzeichen + und -. Erst der Wechselrichter kehrt jeweils nach einer Halbwelle der vom Netz vorgegebenen Frequenz die Polarität des Stroms um. Dies geschieht nicht weich anschwellend, sondern plötzlich, sobald sich das

Vorzeichen der Netzfrequenz ändert. Die entstehende „Wellen“-Form sind nahezu rechteckförmige Plateaus mit abwechselnd positivem und negativem Vorzeichen.

3.2. Diagramme zur Darstellung der Addition von Wechselstromenergien auf S. 8-10

Beispiel 1 zeigt die Addition von drei harmonischen Wechselstromenergien, erzeugt von Synchrongeneratoren. Diese addieren sich im Netz mit dem Flächeninhalt ihrer Halbwellen zur Gesamtenergie, unter strenger Beachtung der Vorzeichen (+ für die positive und – für die negative Halbwellen). Die Summe aller Einzelenergien wird zu 100% verbraucherwirksam.

Beispiel 2 zeigt, wie sich zwei gleich große Wechselstromenergien mit unterschiedlicher Frequenz addieren (ein Synchrongenerator mit 50 Hz und ein Asynchrongenerator mit 50,75 Hz¹⁷). Von 100% der eingespeisten Energie ist die Summe der verbraucherwirksamen Wirkleistung nur 50%. Die übrigen 50% der eingespeisten Leistungen werden zu Verlustwärme sowie zu dynamischen Energieverlusten durch Oberschwingungen.

Beispiel 3 zeigt die Addition von derzeit typischen Wechselstromenergien (ein Synchrongenerator mit 50 Hz, ein Asynchrongenerator mit 50,75 Hz sowie ein Gleichstromerzeuger mit Wechselrichter mit netzgeführter Frequenz).

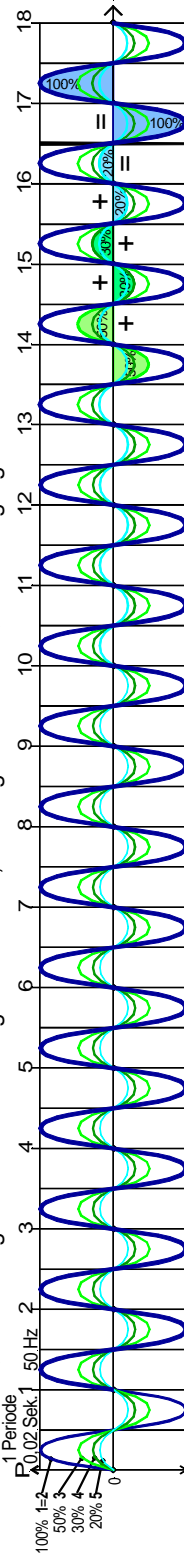
¹⁷ Ausgehend von einem Zeitpunkt Null mit übereinstimmender Phasenlage der Sinusschwingungen (für 0,02 Sekunden) hat ein zweipoliger Asynchrongenerator mit 1,5% "positivem Schlupf" nach 1/3 Sek. eine Phasenverschiebung um 90°, weil sein Läufer dann bereits ein Viertel Umdrehung weiter ist als der Läufer des Synchrongenerators. Nach 2/3 Sekunden ist der Asynchron-Läufer eine halbe Umdrehung weiter, die Phasenverschiebung beträgt 180°. Nach 1 Sekunde ist der Asynchron-Läufer um eine dreiviertel Umdrehung weiter, die Phasenverschiebung beträgt 270°. Nach 1 1/3 Sek. ist der Läufer des Asynchrongenerators um eine Umdrehung voraus: für einen Moment von ca. 0,02 Sekunden besteht wieder Übereinstimmung der Phasenlage. Und so setzt sich das fort.

Bei 90° und 270° Phasenverschiebung addieren sich die eigentlich gleich großen Wechselstromenergien nicht $1 + 1 = 2$ auf, sondern $1 + 1 = 1$ (50% Wirkleistung für die Stromkunden, 50% Blind- und Verlustleistung). Bei 180° Phasenverschiebung sind jeweils die Minushalbwellen der Netzfrequenz zeitgleich mit der Plushalbwellen der Asynchroneinspeisung und umgekehrt. In der Addition herrscht ca. 0,02 Sekunden lang eine 100% große Belastung am Netz – die Summe dieser zwei gleich großen Wechselstromenergien ist in diesem Augenblick $1 + 1 = 0$ (100% Verlustleistung, Wirkleistung 0%).

Addition von Wechselstromenergien

Theodor O. Blum, Belchenstraße 31, 79189 Bad Krozingen
August 2007 / August 2015
T: 07633 924935-1

Beispiel 1: Konventionelle Stromerzeugung mit drei Synchrongeneratoren 3 (50%) + 4 (30%) + 5 (20%) = 1 (100%). Es herrscht Harmonie der Sinusschwingungen aller Einzelleistungen und Oberschwingungen werden vermieden.



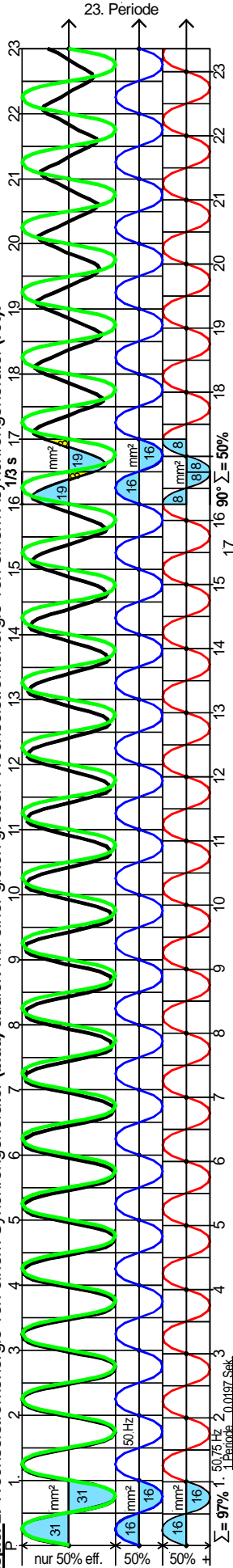
Ergebnis:
1. Belastung am Netz = 100% Leistungsbedarf
2. Addition von 3 (50%) + 4 (30%) + 5 (20%) = 100% Verbraucherwirksame Leistung!

$$20 \text{ mm}^2 + 12 \text{ mm}^2 + 8 \text{ mm}^2 = 40 \text{ mm}^2$$

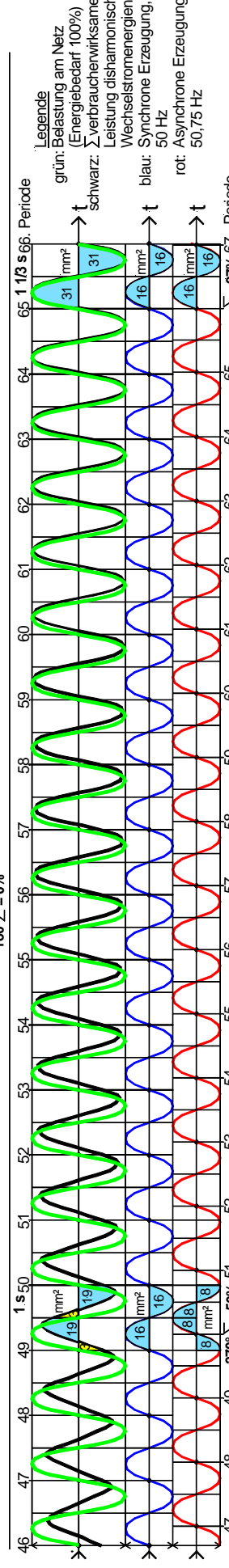
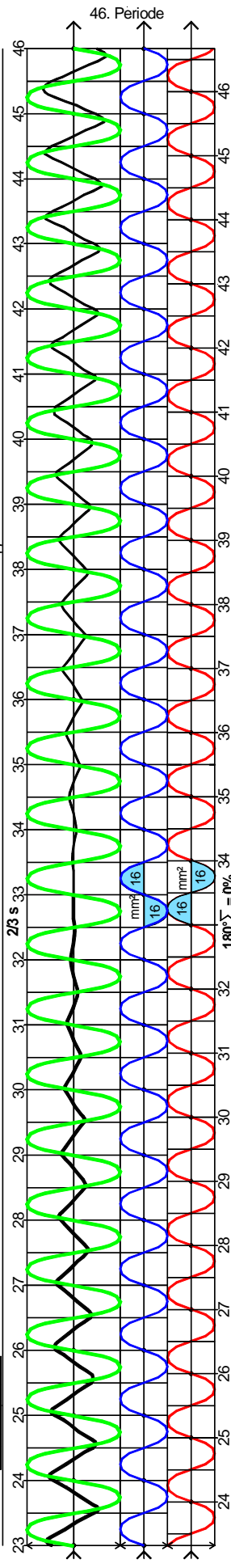
$$2 = 1$$

Der Flächeninhalt einer Sinushalbwelle entspricht deren Energieinhalt

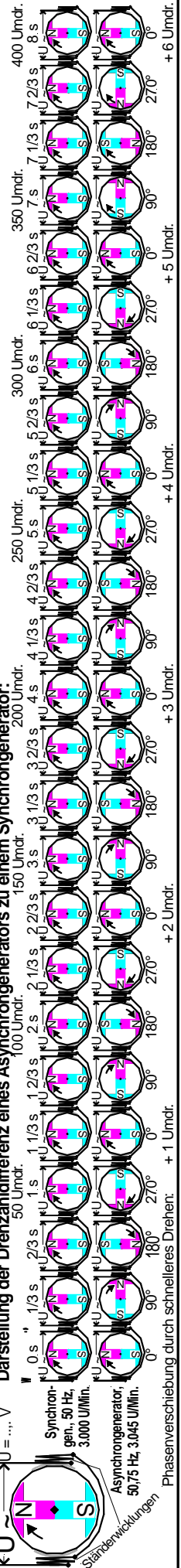
Beispiel 2: Wechselstromenergie von einem Synchrongenerator (blau) addiert mit einer gleich großen Wechselstromenergie von einem Asynchrongenerator (rot):



Zwei gleich große AC-Energien mit ungleicher Frequenz von Synchron- u. Asynchrongeneratoren summieren sich im gemeinsamen Netz nur zu 50% verbraucherwirksamer Wirkleistung. 50% der eingespeisten Leistung ist Verlustleistung in Form von Wärme und dynamisch wirkender Oberschwingungen.



Darstellung der Drehzahl Differenz eines Asynchrongenerators zu einem Synchrongenerator:

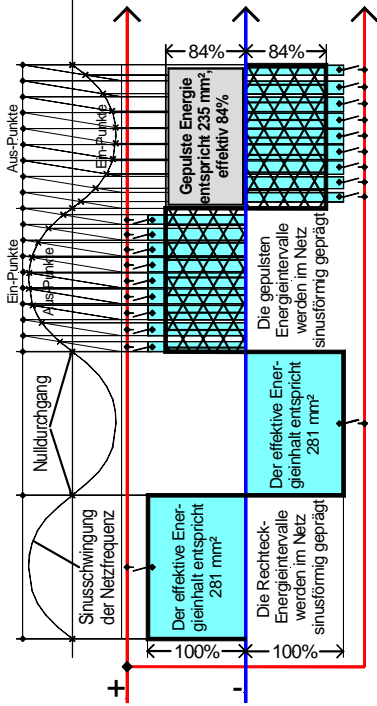


Beispiel 3: Addition von Wechselstromenergien mit unterschiedlicher Frequenz und disharmonischer Sinussschwingung

Theodor O. Blum, Belchenstraße 31, 79189 Bad Krozingen
August 2007 / Februar 2017
T: 07633 9249361

In Massen eingesetzte Wechselrichter:

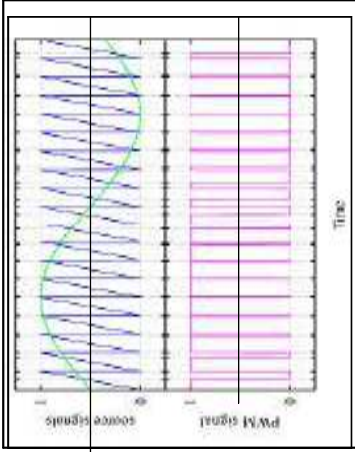
Standard-Wechselrichter erzeugen typische Rechteckschwingungen



Wechselstromenergie von tausenden Wechselrichtern wird in das Stromnetz eingespeist, in Summe mit Leistungsspitzen über 50% der maximalen Netzbelastung von ca. 80 GW.

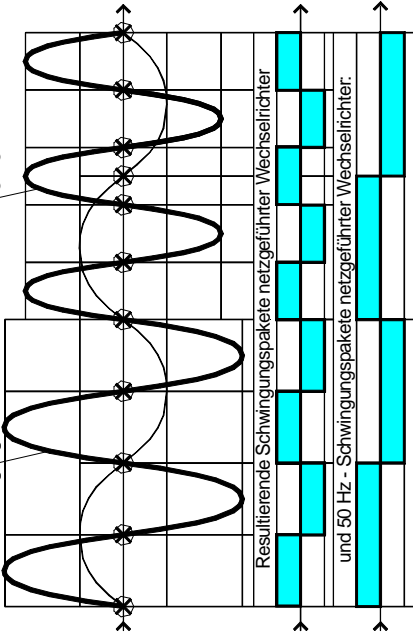
Erklärung der Pulsweitenmodulation in Wikipedia:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Pulsweitenmodulation#/media/File:Pwm.png>

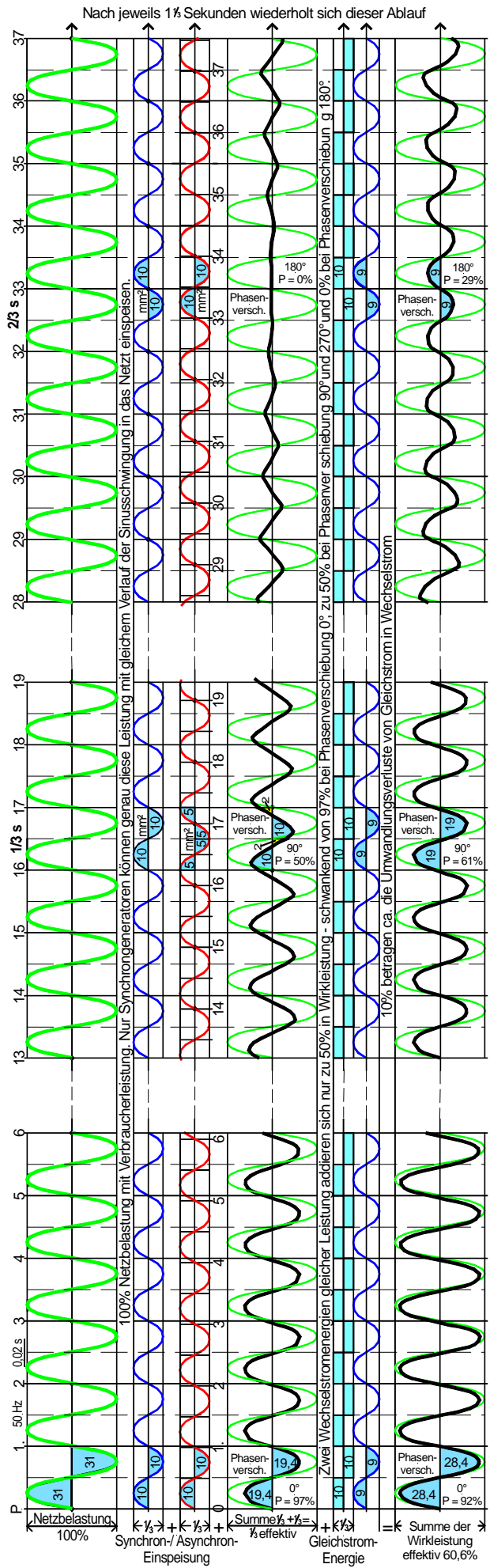


Sinusförmiger Verlauf (grün) kann durch Vergleich mit einem sägezahnförmigen Signal (blau) in ein unten in rosa dargestelltes PWM-Signal umgewandelt werden: Für jeden PWM-Puls durchläuft die Sägezahnrampe den ganzen Wertebereich – auf ausreichend träge Verbraucher wirkt der PWM – Spannungsverlauf wie eine Sinusspannung.

Oberschwingungen mit sehr großer Amplitude, z. B.:
Oberschwingung mit 100 Hz
Oberschwingung mit 150 Hz



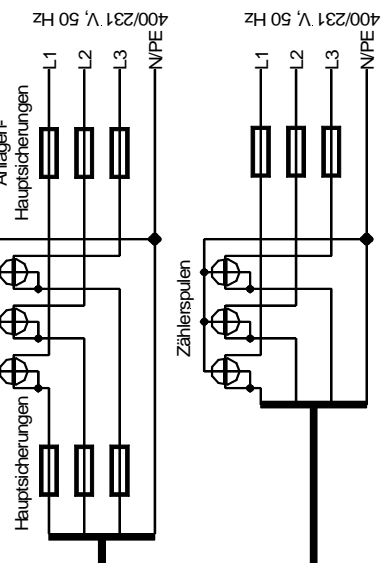
Die Auswirkungen solcher Energieeinspeisung in das Stromversorgungsnetz lassen sich nur erahnen. Dies ist auch die Ursache für das Verschwinden der Synchronuhren weil diese immer öfter "vor gehen" und Wecker zu früh weckten.



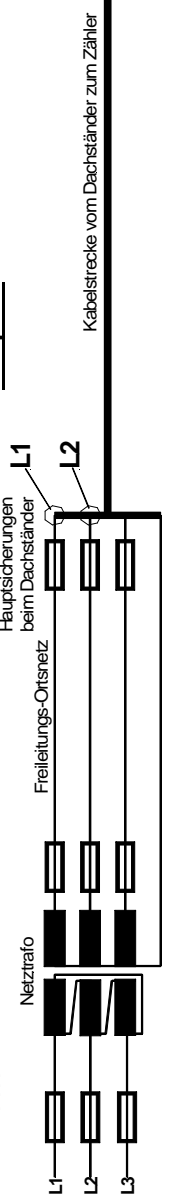
Latente Schwingkreise

a) Reihenschwingkreise

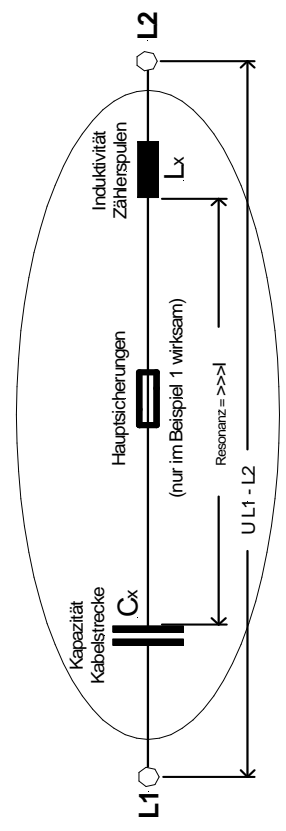
Beispiel 1



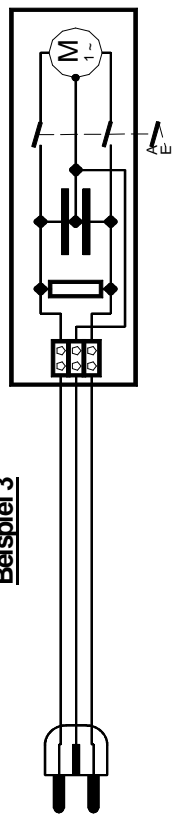
Beispiel 2



Ersatzschaltbild Reihenschwingkreis



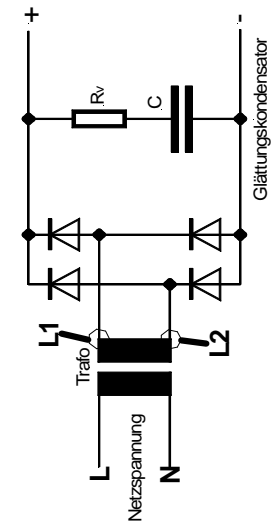
Beispiel 3



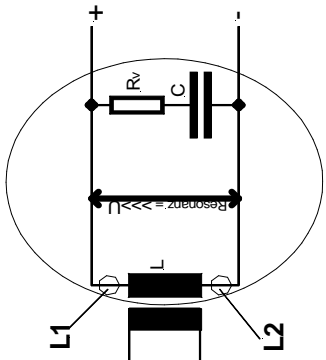
Sind die Resonanzbedingungen an den Punkten L1 und L2 auch nur für die Dauer von wenigen Millisekunden erfüllt, erfolgt blitzartiger Stromanstieg innerhalb eines Reihenschwingkreises¹. Vor und nach dem Schwingkreis gibt es weder Zerstörungen noch die Möglichkeit, mit Messungen etwas festzustellen. Im Beispiel 1 ist ein Überstromschutz wirksam. Im Beispiel 2 sind die Hauptsicherungen im Resonanzfall kein Überstromschutz. Hier muß das Kabel durchbrennen. Durch den Lichtbogen wird Brennbares gezündet. Beispiel 3 zeigt eine typische Anschlußleitung mit Geräteentstörung für Klein- und Hausgeräte.

b) Parallelschwingkreise

Beispiel 4



Ersatzschaltbild Parallelschwingkreis



Sind die Resonanzbedingungen an den Punkten L1 und L2 auch nur für die Dauer von wenigen Millisekunden erfüllt, erfolgt blitzartiger Spannungsanstieg innerhalb des Parallelschwingkreises. Vor und nach dem Schwingkreis gibt es weder Zerstörungen noch die Möglichkeit, mit Messungen etwas festzustellen¹. Beispiel 4 führt am häufigsten zur Zerstörung des Gleichrichters und des Kondensators.

¹Eine ei. Resonanz ist bildhaft vergleichbar mit Wirbeln und Strudeln in einem wilden Fließgewässer. Deren Existenz und Energie ist mit Pegelstands- und Fließgeschwindigkeitsmessungen ebensowenig nachweisbar wie ei. Resonanzen mit Spannungs-, Strom-, Leistungsfaktor- oder Leistungsmessungen.