

TECHNICAL



EINFACHE TECHNIK DIE BEGEISTERT

Nach über 150 Jahren hat sich die Elektrotechnik in seinen Grundprinzipien kaum verändert. Die Wissenschaft, neue Materialien, hochgenaue Messinstrumente und die ständige Weiterentwicklung tragen dazu bei, dass vorhandene Effizienzpotentiale im Bereich der elektrischen Energie und zum Wohl von Mensch und Natur optimal genutzt werden können.

«So wenig wie möglich und so viel wie nötig, wenn es um den elektrischen Energieverbrauch geht»

LIVARSA GmbH

Stand 5. September 2022

Aus den vier Grundbausteine Spule, Widerstand, Diode und Kondensator entstand die analoge Elektrotechnik. Bis in die 70-80' Jahre war die Elektrotechnik einfach und überschaubar aufgebaut und sie stand im Einklang mit dem Naturphänomen Strom und Spannung. Auch nach über 150 Jahren hat sich die Elektrotechnik in seinen Grundprinzipien kaum verändert, jedoch sind große Teile des Einklangs verloren gegangen!



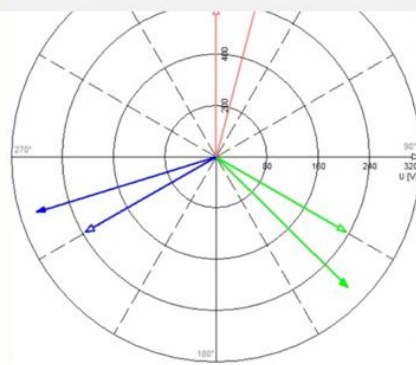
Mehrere kleine Effekte mit großer Wirkung!

Der einfache Aufbau mit der Summe seiner Effekte reduziert Verluste und Störungen. Dadurch wird die Energieübertragung im gesamten Netz nachhaltig verbessert.

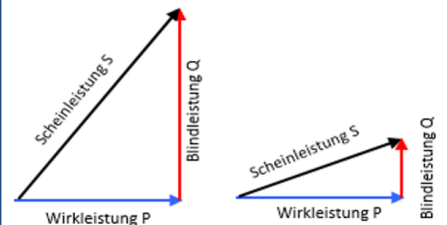
Filterung



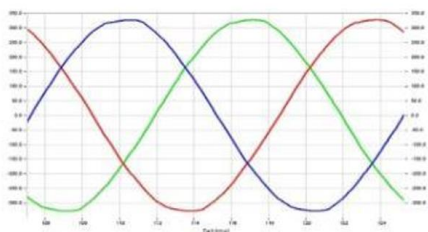
Sternpunktverschiebung



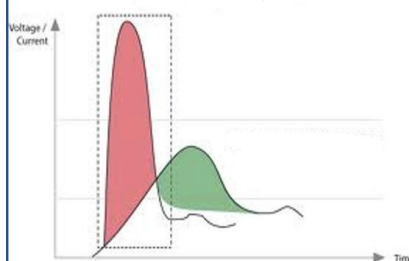
Korrektur



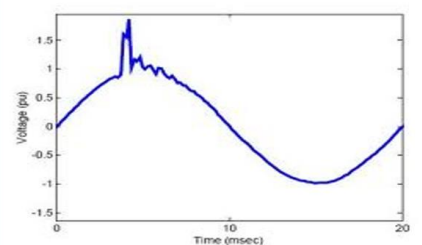
Ausgleich



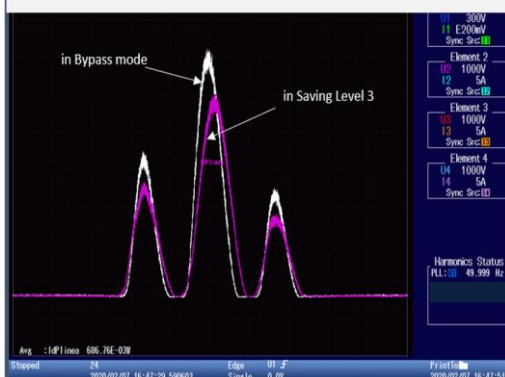
Softstart



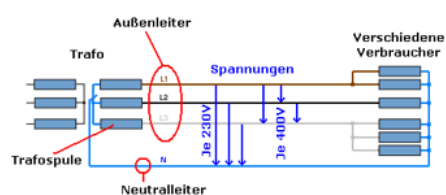
Begrenzung



Wellenform



Neutralleiterstrom



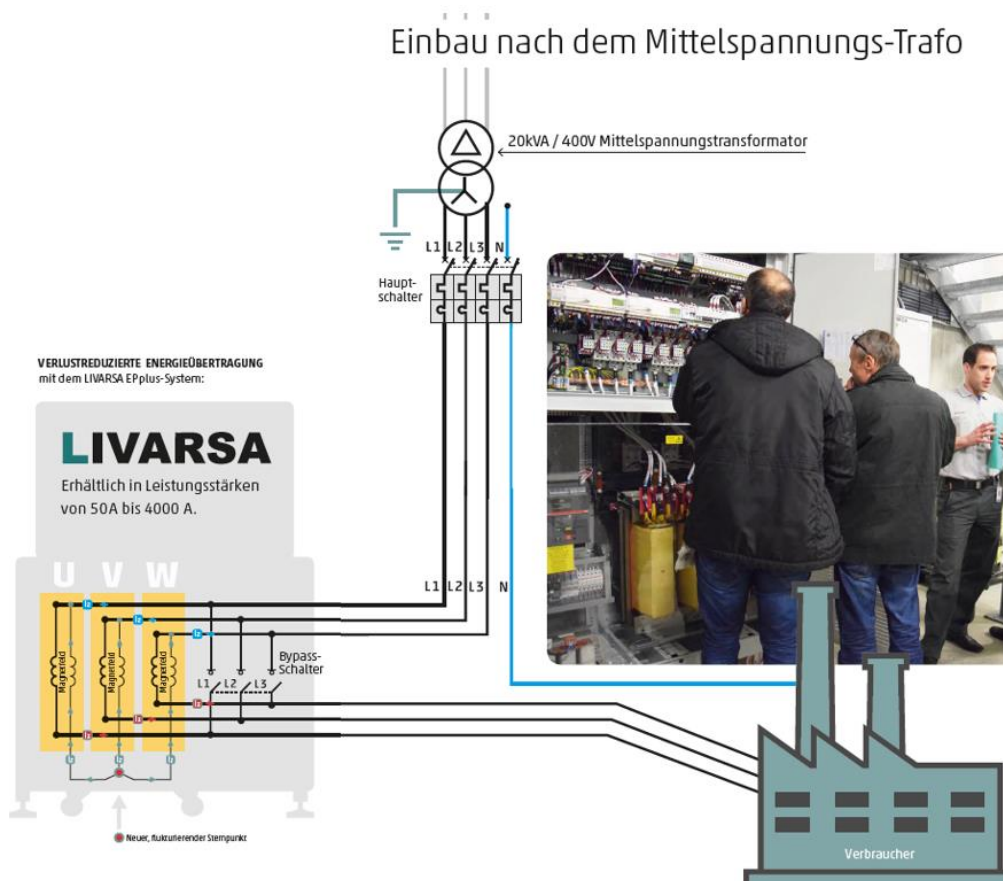


Einleitung

Das Livarsa Filter-System dient der Effizienzsteigerung durch die Verbesserung elektrischer Netzparameter – kurz, dem filtern und optimieren unerwünschter Effekte. Hierzu gehören die Reduzierungen von Netzzrückwirkungen, Asymmetrien in Spannung und Strom, Oberschwingungen und Blindleistungsbedarfe. Es handelt sich technisch um einen dreiphasigen Drehstrom-Transformator, dessen Primärwicklung in Serie am Netzzugangspunkt zwischen Ortsnetztransformator und Industrieanlage geschaltet wird und der wie ein Filter wirkt. Die Primärwicklungen sind als Bänderwicklungen, die Sekundärwicklungen als Lagenwicklungen mit jeweils Gießharz imprägniertem Papier isolierlagen ausgeführt.

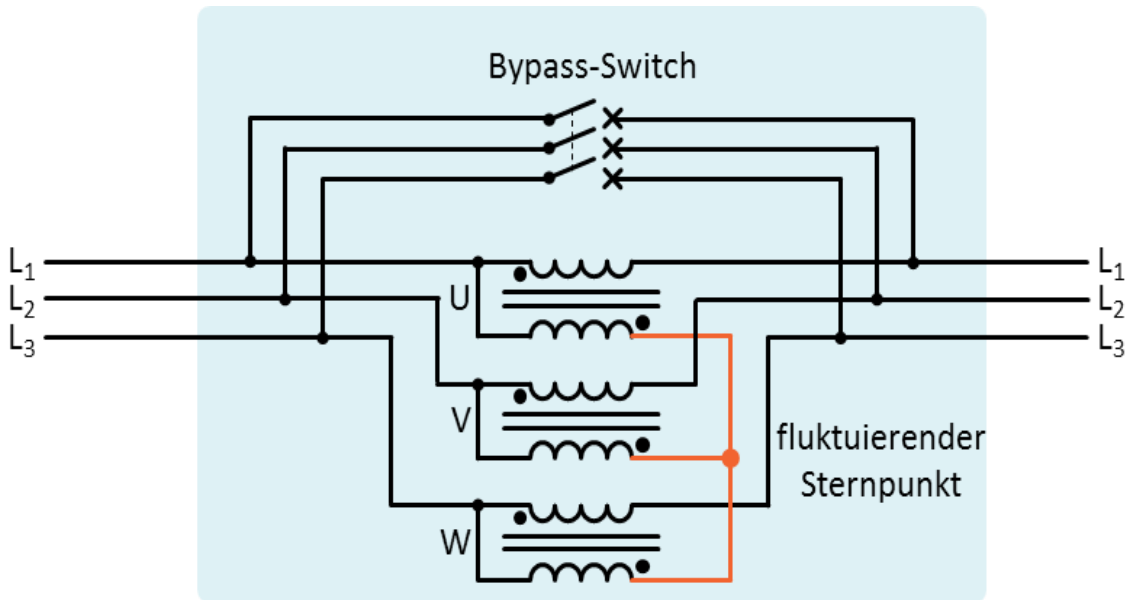


Einbau nach dem Mittelspannungs-Trafo





Einleitung



Die Sekundärwicklung ist der Primärwicklung entgegengewickelt. Zu einem großen Teil sind die Sekundärwicklungen durch den Einsatz von Distanzblechen, im Vergleich zur Primärwicklung mit großen Luftanteilen gewickelt. Die Sekundärwicklung verfügt über vier Wicklungsanzapfungen, die je nach Modell unterschiedliche Windungszahlen tragen. Der Transformatorkern ist mit Elektroblech und drei Schenkeln ausgeführt, die jeweils übereinanderliegend die Primär- und Sekundärwicklungen tragen.

Die netzseitigen Enden der Sekundärspule werden auf die netzseitigen Anschlüsse der Primärspule zurückgeführt. Die anlagenseitigen Anschlüsse der Sekundärspulen sind zu einem schwebenden oder auch fluktuierenden Sternpunkt zusammengeschaltet.

Zur Überbrückung der Anlage, z.B. für Wartungsarbeiten oder auch zum Zwecke von Effizienzmessungen ist zusätzlich ein Bypass-Schalter installiert. Zum Einschalten der Anlage ist weiterhin eine parallele RL-Schaltung zur Reduzierung von Spannungsverzerrung bei Ein- und Umschaltvorgängen und zum Softstart installiert.

Die Wirkung des Filter-Systems entspricht im Wesentlichen dessen eines passiven induktiven Netzfilters kombiniert mit den grundlegenden Funktionsprinzipien eines Transduktors. Der Filter funktioniert nur im Zusammenspiel mit dreiphasigen Drehstromsystemen.



Technologie und Wirkungsweise des EP+ Systems

Elektrische Wirkungsweise

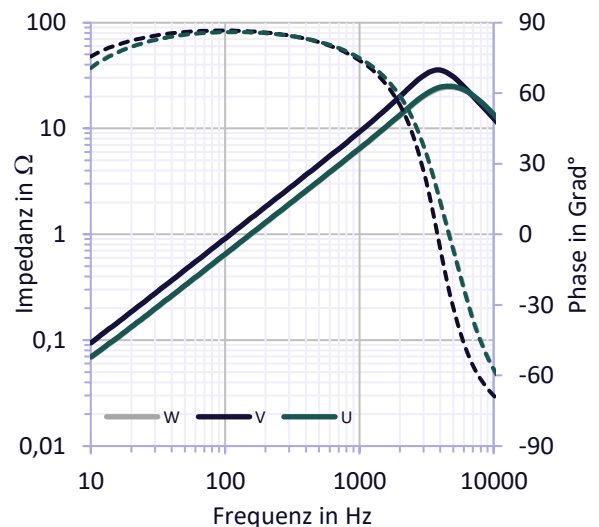
Induktivität der Primärwicklungen

Die elektromagnetische Induktion ist eines der grundlegenden Phänomene der Elektrophysik. Die induktive Wirkung der Primärwicklung entspricht der, normaler Leitungsdrosseln, wie sie aus auch aus Mittel- und Hochspannungsanlagen bekannt sind. Typischerweise werden Drosselspulen/Induktivitäten zum Ausgleich kapazitiver Leistungsfaktoren eines Stromkreises eingesetzt. Diese werden in der Regel von langen Freileitungen oder von deutlich kürzeren Kabelstrecken verursacht. Bei geringen Lasten kann am Leitungsende die Spannung ansteigen (Ferranti-Effekt). Dies kann ursächlich bei Systemen auftreten, die gerade in den ersten Jahren nach der Installation nur gering belastet werden.

Die Drosselspulen erzeugen eine induktive Kompensation als Schutz vor diesem Effekt. Zu den weiteren Vorteilen von Drosselspulen zählt der Schutz gegen Generator-Eigenerrregung bei voreilenden Leistungsfaktorlasten (kapazitives $\cos\varphi$) und die Verringerung von Überspannungen in fehlerfreien Phasen im Anschluss an einen einzelnen Erdschluss. Negativ kann sich jedoch der Spannungsabfall entlang der Drosselspule auswirken, der je nach Belastung unterhalb der zulässigen Toleranzen absinken kann. Als Gegenmaßnahmen sind hier Änderungen des Übersetzungsverhältnisses des Netztransformators (falls vorhanden und/oder möglich) und/oder die Gegenkopplung der Sekundärwicklung bei der Inbetriebnahme entsprechend einzustellen.

Filterwirkung der Haupt-Induktivitäten

Wie jede Spule, so wirkt auch die Primärwicklung, die in Serie zwischen Netzzugangspunkt und Firmennetz geschaltet wird wie ein induktives Tiefpassfilter erster Ordnung. Die Filterwirkung steigt mit der Frequenz an, entsprechend vergrößert sich die Impedanz zu größeren Frequenzen hin. Dadurch wird ein größerer Spannungsabfall für hohe Frequenzanteile realisiert. Somit werden für die nachgeschalteten Anlagen hohe Frequenzanteile aus dem Spannungssignal herausgefiltert und so die Spannungsqualität gleich am Anschlusspunkt des Firmennetzes verbessert.



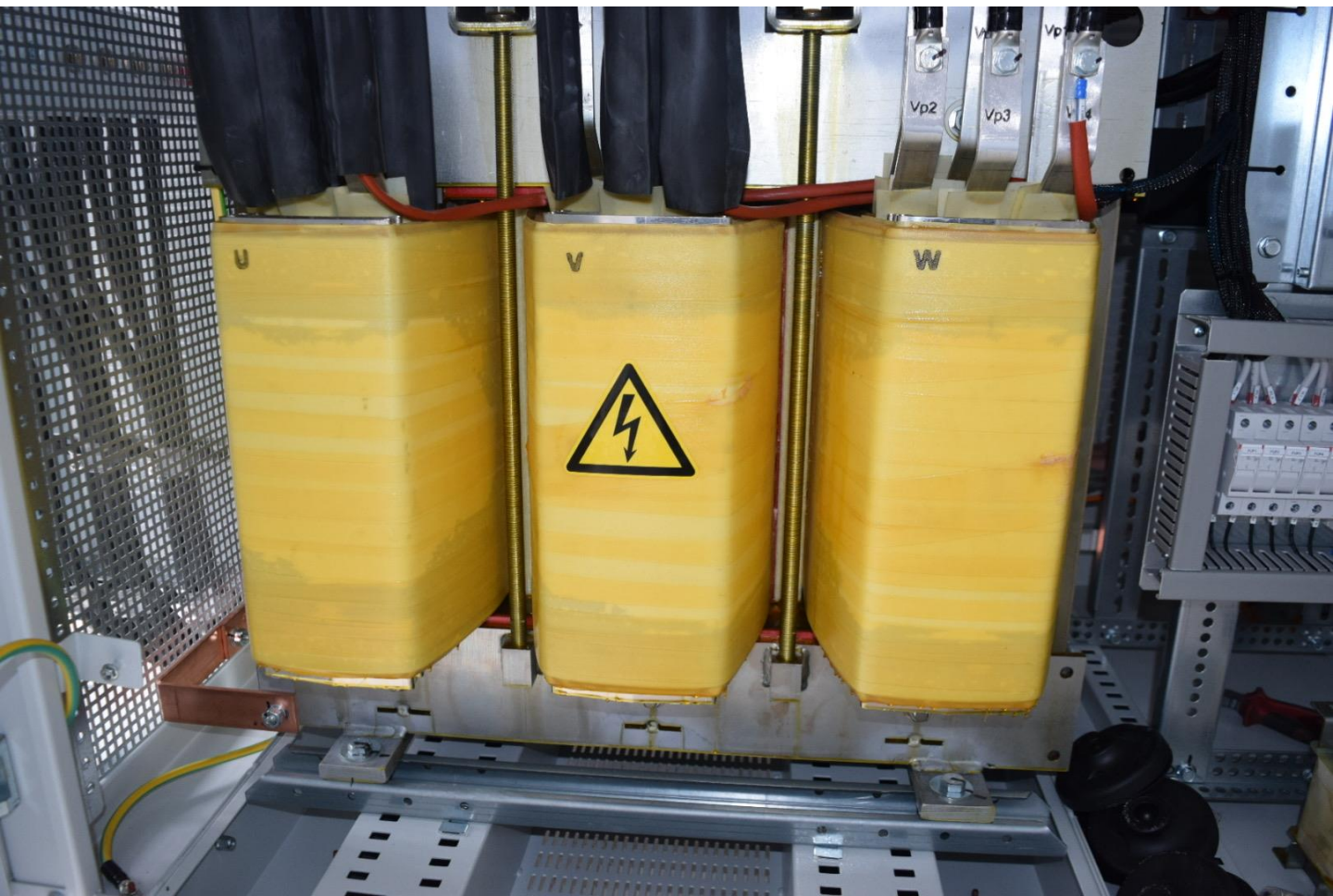
Impedanzmessung der Primärspulen (Betrag und Phase) an einem 160A Filter



Spannungsbegrenzung, durch das natürliche magnetische Verhalten von Spulen

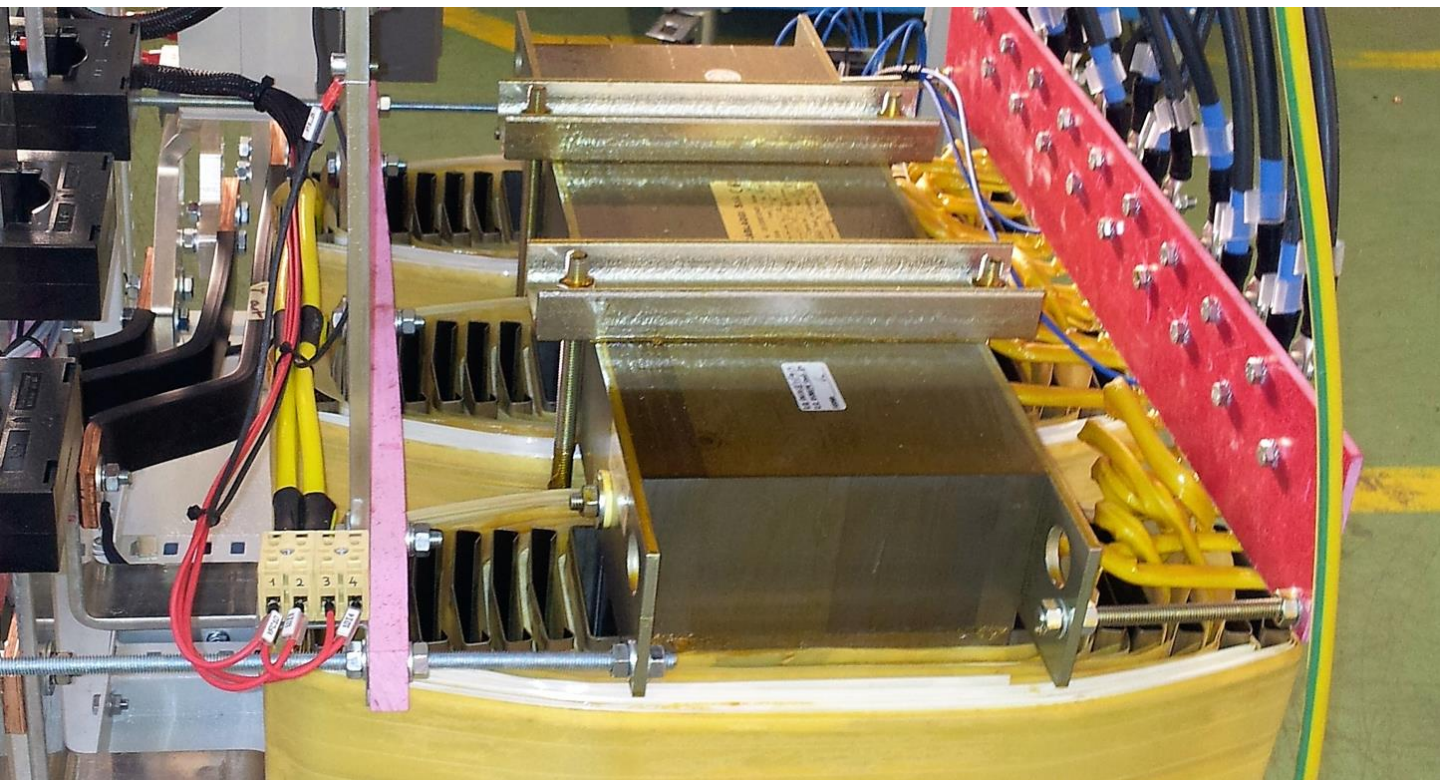
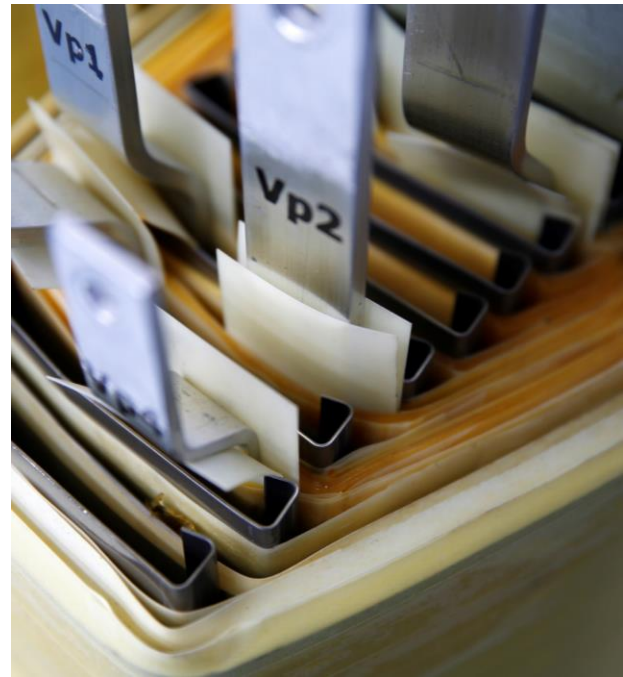
Überspannungsspitzen oder kurzzeitige Spannungseinbrüche werden durch das natürliche Verhalten der Spule reduziert (Lenz'sche-Regel). Die Lenz'sche Regel besagt, dass die induzierte Spannung einen Strom stets in die Richtung treibt, um eine Änderung des magnetischen Flusses zu verhindern. Die Änderung des magnetischen Flusses ist nach dem Induktionsgesetz entsprechend die Ursache, für die Entstehung des Induktionsstromes. Durch die differentielle Abhängigkeit des Stromes vom Wert der Spannungsänderung zeigt sich der begrenzende Effekt umso größer, je größer die Spannungsänderung ist.

Hierdurch werden Spannungsänderungen mit steilen Anstiegen (ein großer Quotient dU/dt) und somit Spannungsspitzen durch einen entsprechenden großen Gegenstrom stärker gedämpft bzw. begrenzt als weniger steile oder langsam ansteigende Spannungen. Dieser Effekt ist bis zur Sättigungsgrenze des Kernmaterials unabhängig von der Frequenz und entsprechend der Permeabilität (typischerweise $\mu_R = 3000 - 100.000$) des Kernmaterials auch entsprechend groß. Darüber hinaus reduziert sich der Effekt deutlich und wirkt nur noch in der Größe einer Luftspule ($\mu_{R_Luft} = 1$).



Der Aufbau der Sekundärspule

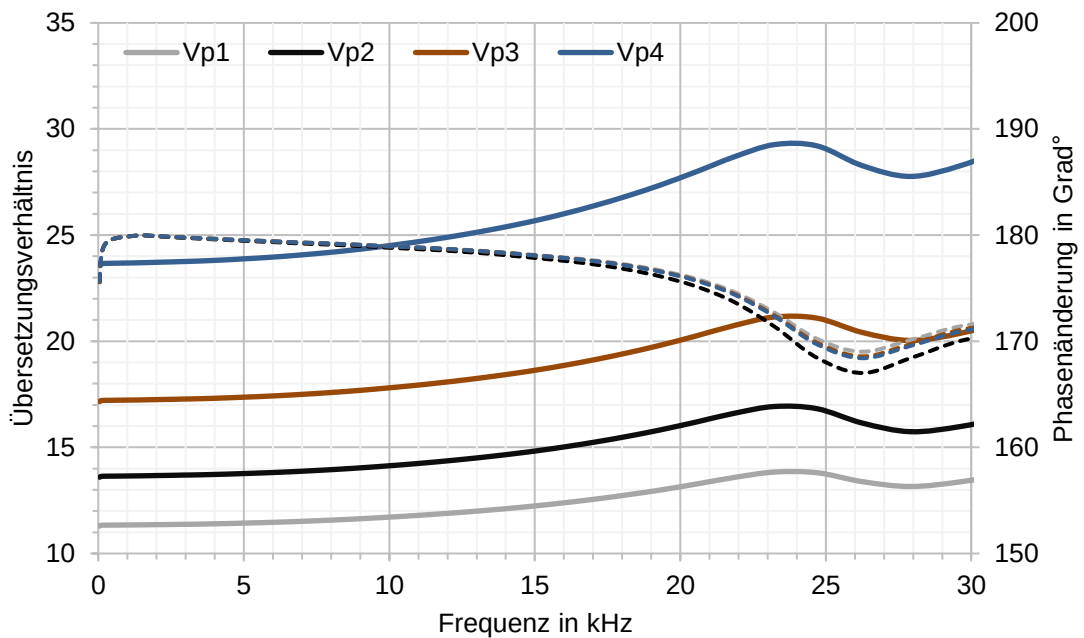
Die Sekundärspule trägt deutlich mehr Windungen als die Primärwicklung. Sie ist als Lagenwicklung ausgeführt und deutlich lockerer mit definierten Luftanteilen gewickelt. Über den gemeinsamen Schenkel von Primär- und Sekundärwicklung sind beide Wicklungen über den gleichen magnetischen Fluss miteinander verkoppelt. Die eingesetzten Distanzbleche in der Sekundärspule führen zum einen zu einer Vergrößerung der wirksamen Spulenfläche und damit zunächst zu einer durch diese Bauart bedingte vergrößerte Induktivität. Andererseits erhöht sich dadurch auch der Streuverlust, der somit begrenzend auf die Induktion der Sekundärspule wirkt. Die Sekundärspule ist der Primärspule entgegengewickelt, so dass sich ein induzierter Spannungsabfall ergibt, der dem der Primärspule entgegenwirkt





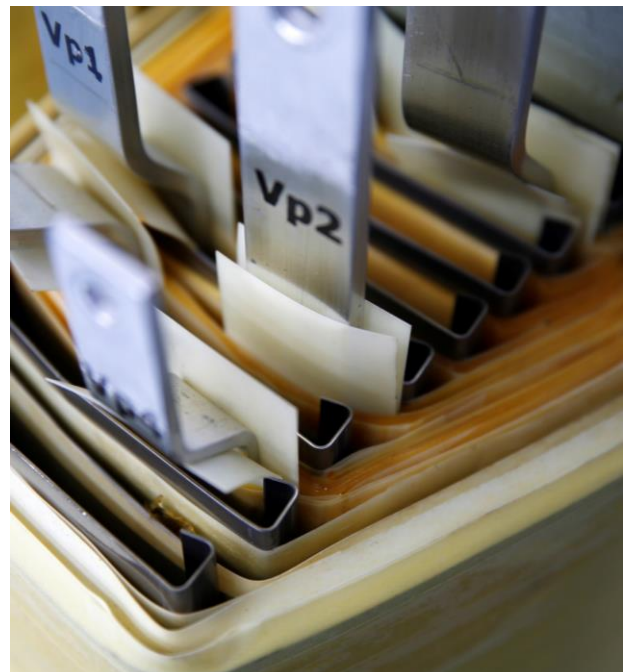
Der Aufbau der Sekundärspulen führt zu einem um 180° phasenverschobenen Induktionsstrom.

Beispiel: Sekundärspule einer 160A EPplus-Anlage



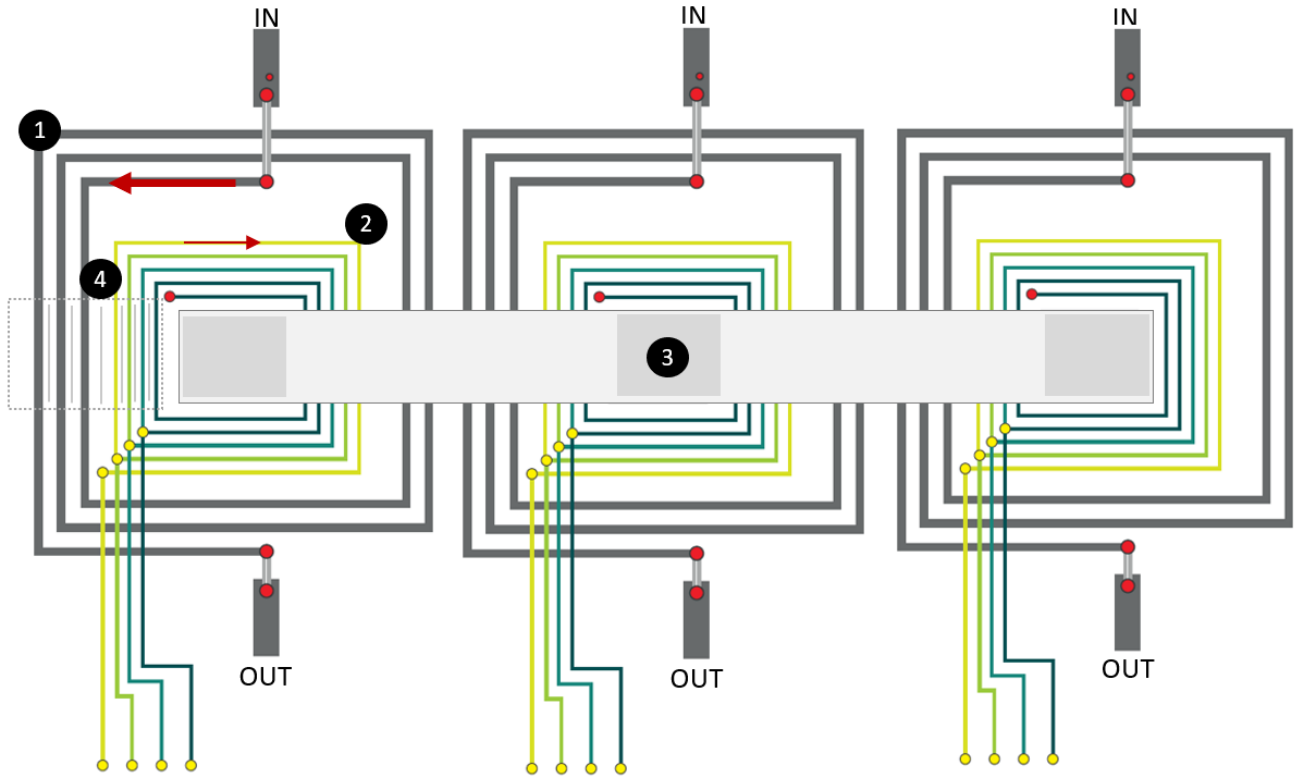
Messung des Übersetzungsverhältnisses zwischen Sekundär- und Primärspule 160A Filter.

Dieser Aufbau führt zu einem um 180° phasenverschobenen Induktionsstrom in der Sekundärspule. In der obigen Abbildung sind die gemessenen Übersetzungsverhältnisse zusammen mit den resultierenden Phasenlagen der vier verfügbaren Wicklungsabgriffen dargestellt. Die Abbildung zeigt eine reale Messaufzeichnung, aufgezeichnet mit einem Netzwerkanalyzer 100 der Firma OMICRON Lab an einem Filter für einen maximalen Betriebsstrom von 160 A. Die Aufzeichnungen wurden nach der Gain/Phase Methode als komplexe Größen aufgezeichnet.

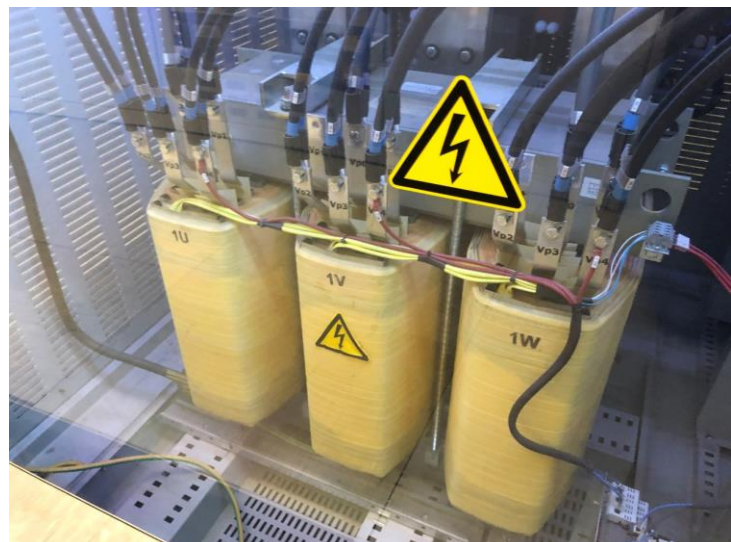




Es kommen einfachen Komponenten zum Einsatz



Der Kern besteht aus einfachen Materialien. Aus in Hartz getränktes Isolierpapier, Aluminium, Elektroblech und Eisen. Über die Hauptwicklung Nr.1 fließt der gesamte bezogene Strom und über in der gegen gerichtete Steuerspule Nr. 2 der Induktionsstrom. Das Eisen Nr. 3 verbindet die drei Spulen U, V und W zusammen und bilden somit den Kern. Mit dem Elektroblech Nr. 4 wird ein Abstand zwischen den Windungen gemacht. An der Steuerspule Nr. 2 an werden vier Kupferkabel angeschlossen und aus der Steuerspule geführt. Alles einfache und bekannten Materialien ohne Leistungselektronik.





Die Voraussetzung der Funktion

Die Voraussetzung des Spannungsausgleichs der Sekundärwicklungen ist die Installation des Filter-Systems in einem dreiphasigen Drehstromsystem.

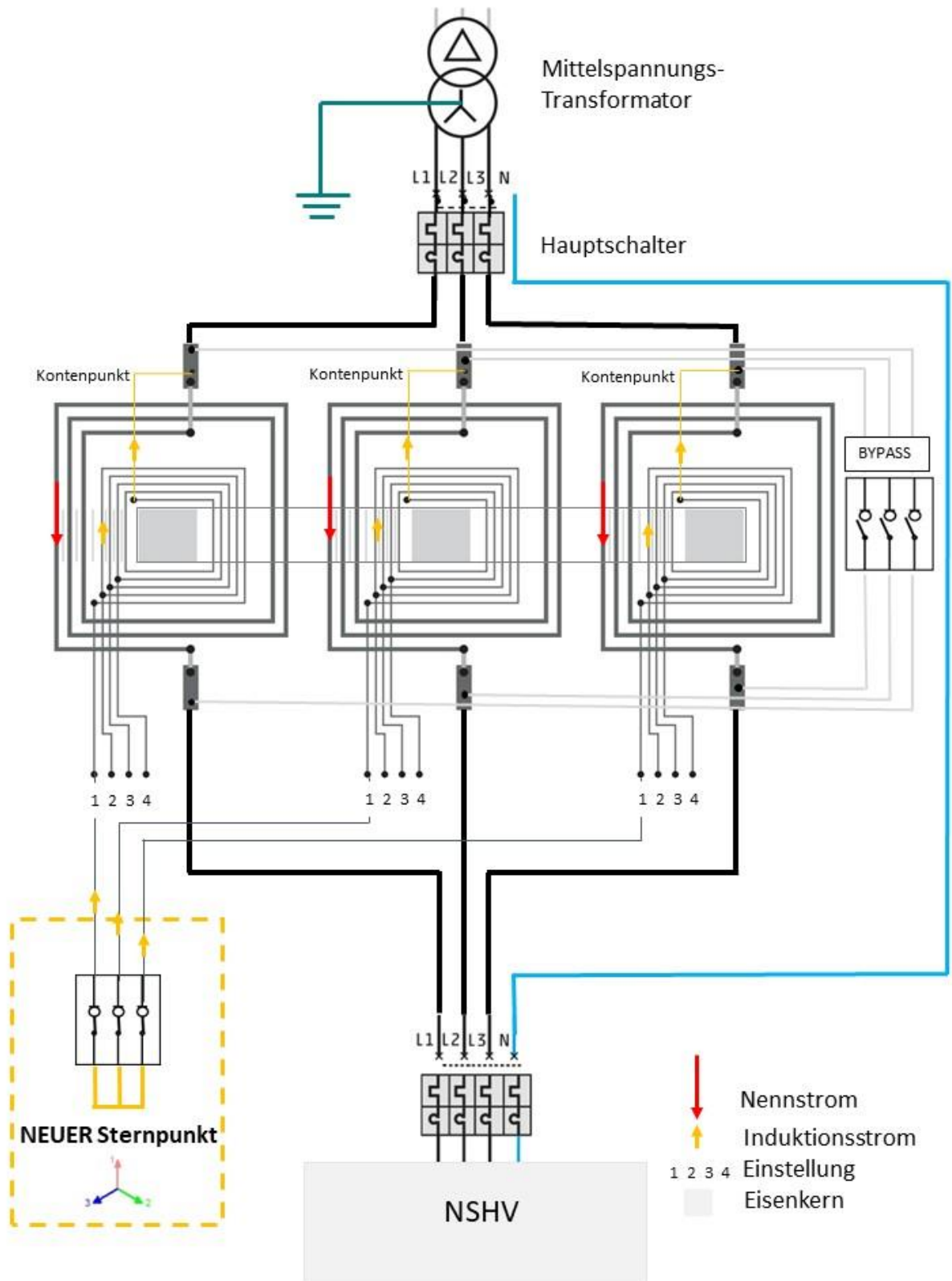
5. Spannungsausgleich der Sekundärwicklungen

Die Voraussetzung des Spannungsausgleichs der Sekundärwicklungen ist die Installation des Filter-Systems in einem **dreiphasigen 400 Volt Drehstromnetzes**.

Ohne diesem ist ein bestimmungsgemäßer Betrieb nicht möglich. Die oberen Enden (hohes Potenzial) der drei Sekundärwicklungen werden zusammen zu einem schwebenden bzw. im Betrieb fluktuierenden Sternpunkt verbunden. Die unteren Enden (niedriges Potenzial) werden auf die netzseitigen Anschlüsse der Primärspulen geführt. Hierdurch baut sich eine Spannung auf, die dem Spannungsabfall der Primärspule entgegenwirkt und so in Summe zu einer Kompensation des primären Spannungsabfalls führt. In der Folge können so je nach eingestelltem Wicklungsabgriff der Sekundärspule der primäre Spannungsabfall nach Bedarf reduziert werden. Erfahrungen haben gezeigt, dass die Spannungsreserven bzw. Niveaus in der Regel über den normativ festgelegten 400V/230V liegen.



Aufbau Prinzipschema





Einstellungen der Wicklungsabgriffe werden den lokalen Bedürfnissen angepasst.

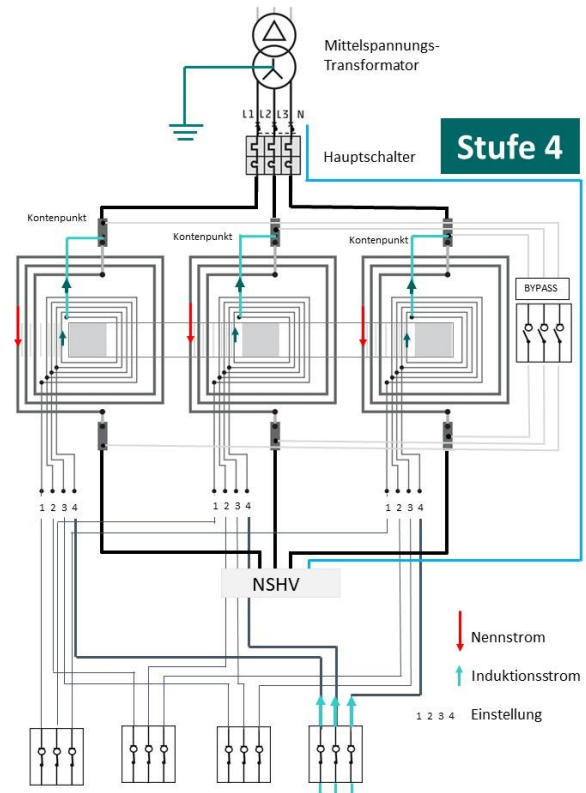
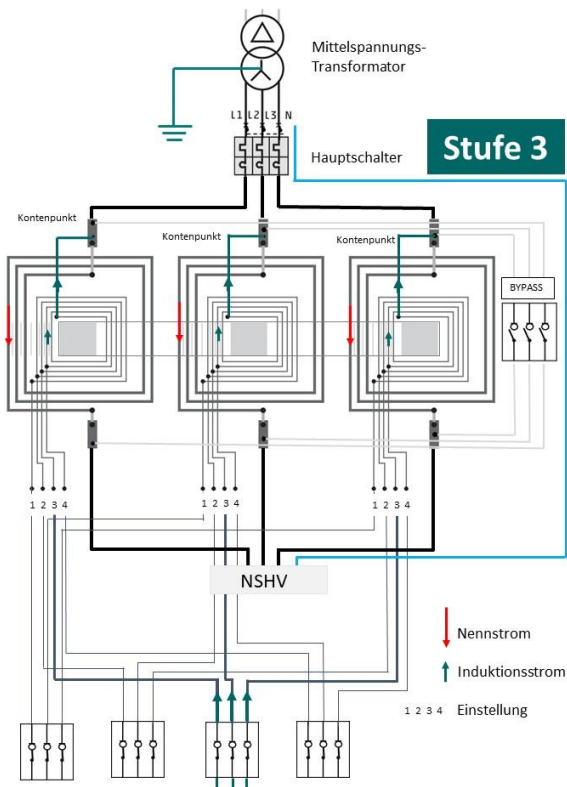
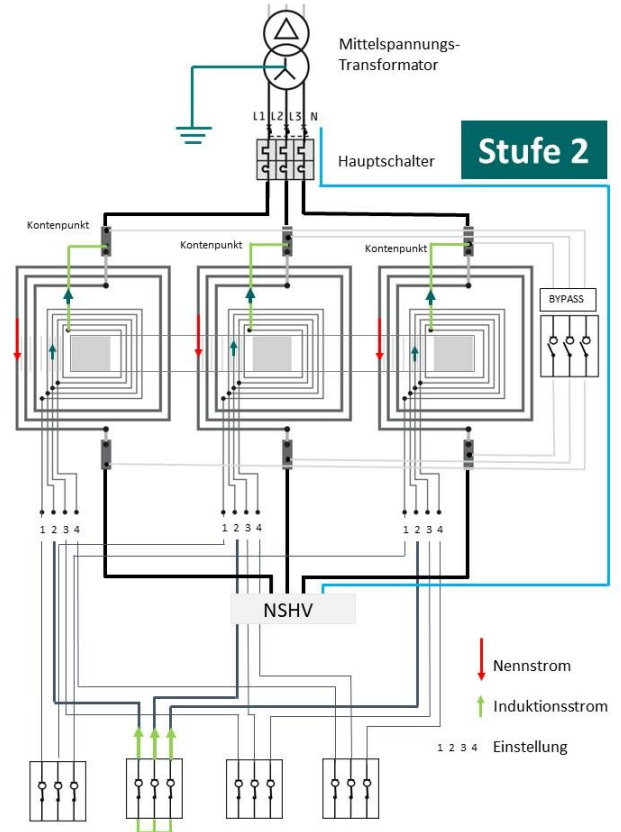
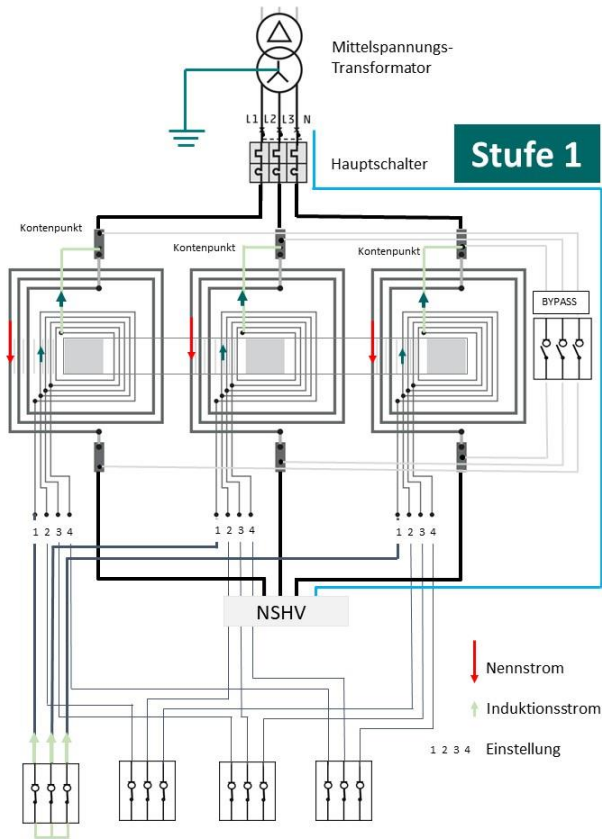
6. Wirkungsweise des schwebenden/fluktuierenden Sternpunkts

Bei idealen symmetrischen Mehrphasensysteme addieren sich stets die Spannungen und Ströme aller Phasen zu Null. So ergibt die Summe der Phasenspannungen $\underline{U}_{1N} + \underline{U}_{2N} + \underline{U}_{3N} = 0$ und auch die entsprechenden Neutralleiterströme $I_1 + I_2 + I_3 = I_N = 0$ bei idealem symmetrischen Betrieb stets zu Null. Im realen Betrieb zeigen sich jedoch in der Regel Asymmetrien in Spannung und Strom. Da die Spannungsabfälle der Primärwicklungen direkt mit der Strombelastung der einzelnen Phasen zusammenhängen, ergeben sich bei asymmetrischem Betrieb auch unterschiedliche Spannungsabfälle in den einzelnen Phasen. In der Folge unterscheiden sich auch die Spannungsabfälle durch die asymmetrischen Induktionswirkungen in den Sekundärspulen. Dadurch addieren sich die Sekundärspannungen zu einem Wert, der in Summe nicht mehr Null ergibt. Der von Null verschiedene Spannungswert weist zudem eine, der unterschiedlichen Belastungen in den Phasen entsprechende, resultierende Phasenlage auf.

Die Spannungen sind durch die entgegengewickelten Sekundärspulen so gerichtet, dass je größer der Strom in einer Phase wird auch ein entsprechend großer, jedoch in der Phase invertierter (180° Phasenverschiebung), Strom zurückgeführt wird - dieser ist bei idealer Symmetrie in Summe ebenfalls Null. Dadurch kommt es zu einer belastungsabhängigen Kompensation der einzelnen Phasen, die netzseitig zu einer Reduzierung/Erhöhung der Spannung bei unsymmetrischer Belastung führt und so netzseitig hervorgerufene Asymmetrien ausgleicht. Der Ausgleich ist durch die Bauart und Dimensionierung des Filter-Systems vorgegeben und kann durch entsprechende Einstellungen der Wicklungsabgriffe variiert und an die vorherrschenden Bedürfnisse angepasst werden.



Einstellungen Stufe 1 bis 4

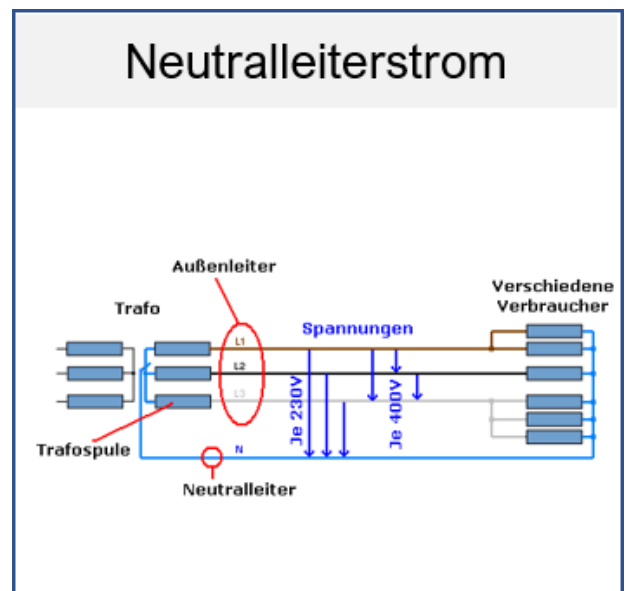


Effekt Neutraleiterstrom – vagabundierende Ströme werden weniger

7. Reduzierung des Neutraleiterstroms

Analog zu den unter dem vorigen Punkt beschriebenen Verhältnissen in Bezug auf die Symmetrie von Spannungen- und Stromverhältnissen in Mehrphasensystemen, können diese Effekte auch auf den zentralen Erdungspunkt (ZEP) bzw. bei geerdeten Sternpunkten auf den resultierenden Neutraleiterstrom angewendet werden. Wie in allen elektrischen Systemen, so fließt auch in Drehstromsystemen der Strom zurück zur Quelle. Bei symmetrischen Systemen, ist kein extra Leiter notwendig, da sich diese im Sternpunkt zu Null addieren. Der Rückstrom fließt in diesem idealen Fall entsprechend des Superpositionsprinzips durch Ausgleichsströme in den vorhandenen Phasen zur Quelle zurück. Sobald sich eine Asymmetrie der Phasen einstellt, fließt im Neutraleiter oder über den Erdungswiderstand ein Strom. Je nach Widerstand des Erdungsnetzwerks bzw. des Erdwiderstands fällt hierüber eine Spannung ab und somit wird darin auch eine Leistung umgesetzt, die zu Verlusten führt.

Zur Reduzierung bzw. Vermeidung eines Neutraleiter- oder Erdungsstroms wird durch den Potenzialausgleich des fluktuierenden Sternpunkts des Filter-Systems (siehe vorheriger Abschnitt) in Bezug auf den Potenzialpunkt des ZEPs bzw. Sternpunkt des Neutraleiters eine Anpassung der Phasenspannungen hervorgerufen. Die Phasenspannungen sind dabei so gerichtet, dass die Spannung in Phasen mit größerer Belastung reduziert wird und so der Asymmetrie entgegenwirkt. Als Ergebnis wirkt diese Maßnahme der durch das Firmennetz verursachten Asymmetrie entgegen und reduziert so den resultierenden Erd- und/oder Neutraleiterstrom und so auch die damit einhergehenden Verluste eines nicht idealen Erdungs- bzw. Neutraleiterwiderstands.



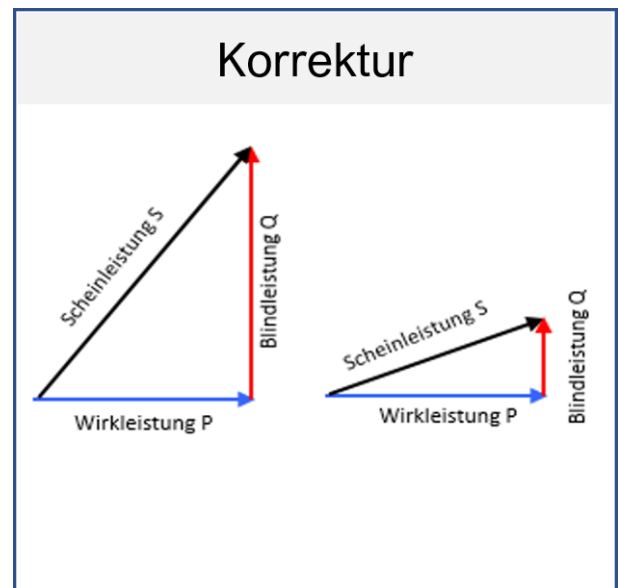


Die Wirkleistungsfaktor wird verbessert

8. Reduzierung des induktiven Blindleistungsanteils (Blindleistungskompensation)

Die in Bezug auf die Primärwicklungen entgegengewickelten Sekundärspulen führen den Strom mit einer Phasendrehung von 180° zurück. Dadurch wirkt dieser Strom wie bei übererregtem Generatorbetrieb und gibt somit Blindstrom an das dahinterliegende Firmennetz ab. Wie auch beim übererregten Generatorbetrieb, kann so ein Teil der zur Kompensation von Asynchronmaschinen benötigten kapazitiven Blindleistung durch die über den LIVARSA-System entnommene Scheinleistung verfügbar gemacht werden. Hierdurch können die Belastung bzw. die Größe benötigter Kondensatoren reduziert werden oder es können vorhandene Anlagen in größeren Kompensations-Bereichen betrieben werden. Auch hier hängt die Größe des Blindleistungsanteils vom eingestellten Wiclungsabgriff ab. In Summe ergibt sich eine Reduzierung der Scheinleistung durch einen reduzierten Blindleistungsanteil bei gleichbleibender Wirkleistung. Der Wirkleistungsfaktor wird verbessert.

werden oder es können vorhandene Anlagen in größeren Kompensations-Bereichen betrieben werden. Auch hier hängt die Größe des Blindleistungsanteils vom eingestellten Wiclungsabgriff ab. In Summe ergibt sich eine Reduzierung der Scheinleistung durch einen reduzierten Blindleistungsanteil bei gleichbleibender Wirkleistung. Der Wirkleistungsfaktor wird verbessert.



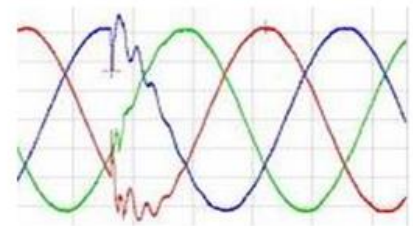


Mehrere kleine Effekte mit großer Wirkung!

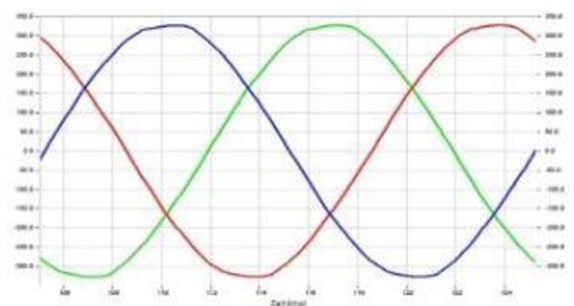
9. Filterwirkung der Sekundärwicklung

Die Filterwirkung basiert auf dem gleichen Prinzip, wie die der Primärwicklung. Der entscheidende Unterschied besteht in der Induktivität der Sekundärspule und des mit Luftanteilen versehenen Spulenkerns. Die Sekundärspule trägt deutlich mehr Windungen als die Primärspule, zudem ist der wirksame Spulenquerschnitt durch die durch Distanzbleche eingeschlossenen Luftspalte deutlich vergrößert. Die Induktivität der Sekundärspule ist somit deutlich größer als die der Primärspule. Damit ist die Filterwirkung und Suppression von Oberschwingungen und Überspannungen deutlich größer als in der Primärwicklung – die genauen Parameter hängen hierbei vom Typ und der Einstellung des EP+ Systems ab. Die erhöhte Filterwirkung stellt dabei sicher, dass der rückgeführte Strom und der fluktuierende Sternpunkt möglichst geringe Oberschwingungsanteile und Störungen enthalten. Damit wird die Filterwirkung um eine weitere Ordnung für den gegengekoppelten Spannungsanteil erhöht und auch so die Spannungsqualität verbessert.

Filterung



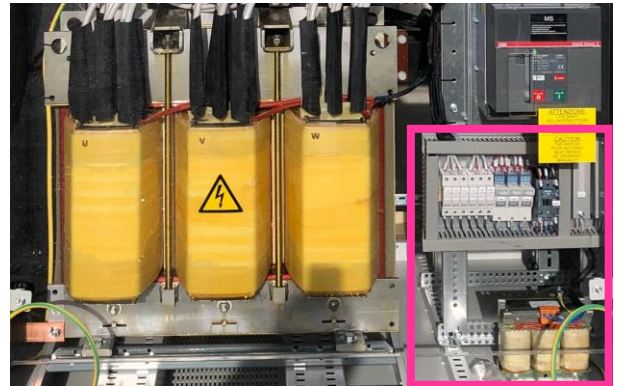
Ausgleich



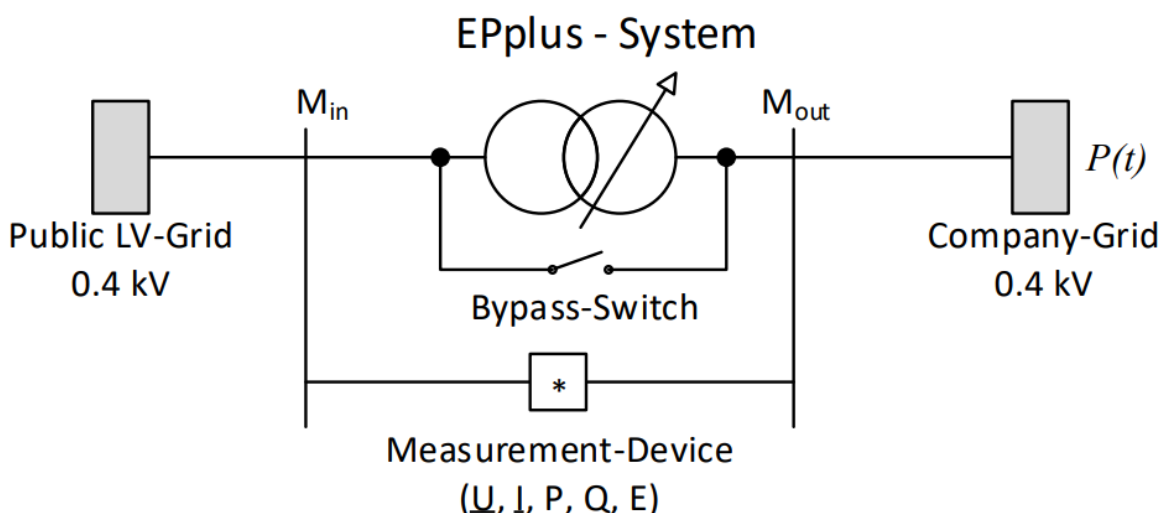
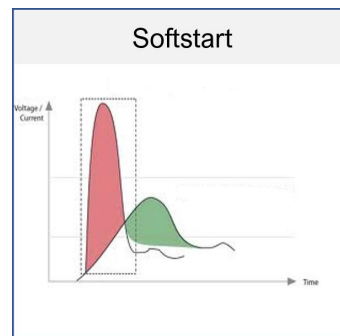
Das Umschalten mit dem BYPASS ist unterbrechungsfrei

10. Softstart – Reduzierung unerwünschte Einschalteffekte

Zusätzlich zum Transformator ist netzseitig ein RL-Element gegen Erde zur Reduzierung von Einschaltspannungsverlagerungen installiert. Beim Ein-, Aus- oder Umschalten von in Reihe geschalteten Induktivitäten kann es je nach Belastung zu Spannungsverlagerungen kommen. Diese können so ausfallen, dass der Betrieb gestört oder Schutzmaßnahmen ausgelöst werden, die einen negativen Einfluss auf den Netzbetrieb haben. Zur Vermeidung von Störungen wird vor den Schalthandlungen für eine definierte Zeit, die im Wesentlichen von der Größe des Filter-Systems abhängt, das RL-Element aktiviert. Hierdurch wird die Spannung gestützt, so dass ein negativer Spannungseinfluss beim Schalten reduziert bzw. verhindert. Bei Gleichspannungsverlagerungen stellt der induktive Anteil der des RL-Elements einen Kurzschluss für die Gleichanteile dar, der dadurch eine Verlagerung verhindert und so auch das Ausbleiben von Nulldurchgängen. Nach erfolgter Schalthandlung wird das RL-Element wieder getrennt.



RL-Element





Die in dieser Beschreibung aufgeführten und erklärten Effekte und Wirkungsweisen wurde bewusst isoliert erklärt!

Die in dieser Beschreibung aufgeführten und erklärten Effekte und Wirkungsweisen wurde bewusst isoliert erklärt und beschrieben. Beim Betrieb des Filter-Systems können diese generell nicht isoliert voneinander betrachtet werden. Vielmehr sind die beschriebenen Effekte dynamisch miteinander verknüpft und wirken stets zusammen. Die Verknüpfungen sind hierbei die magnetische Kopplung von Primär- und Sekundärspulen über den Transformatorkern, die Rückkopplung des Stroms der Sekundärspule zur Netzseite hin und die Verknüpfung der Potenziale von fluktuierendem Sternpunkt der Sekundärspulen mit dem Potenzial des ZEPs bzw. Sternpunkts des Neutralleiters und der Spannungsverhältnisse an den Primärspulen. Weiter sind durch die Definition des Drehstromsystems alle drei Phasen miteinander verkettet und stehen in Wechselwirkung mit den Netzkomponenten des Netzbetreibers.

Um die Wirkungsweise und die Verhältnisse vor Ort beurteilen und überwachen zu können sind die Aufzeichnung und das Monitoring der Netzparameter am Netzzugangspunkt erforderlich. Heutige Firmennetze unterliegen ständigen Änderungen in Topologie und Betrieb und auch das Versorgungsnetz der Netzbetreiber unterliegt ständigen Wandlungen, sei es durch Zubau von Verbrauchern oder Energieversorgungsanlagen (Wind, PV, etc.) oder durch den Betrieb verursachte Betriebsschwankungen. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Netzparameter nach Installation statisch sind. Es ist vielmehr so, dass ständige Veränderungen auch Maßnahmen erfordern, um die Versorgungsqualität und Stabilität des Betriebes aufrechtzuerhalten. Umfangreiche Messungen und Erfahrungen haben gezeigt, dass die Filter-Systeme die Effizienz des Netzbetriebs steigern, Netzzurückwirkungen reduzieren und die elektrische Versorgungsqualität verbessern helfen.



