



Thema: Schulung zum Thema „Elektrische Maschinen“, Arten und deren Wirkungsweisen  
Subject:

Datum: 17.03.2025  
Date:



Das Ingenieurbüro John wurde von TGM Kanis gebeten, für das Personal der Projekt- und Baustellenleiter eine Schulung mit dem Thema „Synchrongeneratoren, Aufbau und Wirkungsweise, sowie deren Nebenanlage, dem Erregersystem“ durchzuführen.

Da es sich im Rahmen des Teilnehmerkreises um Mitarbeiter handelt, welche die internen Wirkprinzipien elektrischer Maschinen nicht täglich behandeln, habe ich mich bemüht, das Thema ohne aufwendige mathematische Formeln und Vektor-Diagrammen, allgemeinverständlich zu erklären.

Inhaltsangabe: Schulung zum Thema "Elektrische Maschinen", Arten und deren Wirkungsweise

1. Physikalische Grundlagen der elektro- magnetischen Wechselwirkung und der daraus resultierenden Kraft
2. Ausführungsformen von Innenpol- Synchronmaschinen
3. Maschinendiagramme und Kennlinien
  - 3.1. Die Kurzschluss- und Leerlaufkennlinie
  - 3.2. Das Leistungs- Diagramm
4. Erforderliche Messungen vom Stillstand bis zum Netzparallelbetrieb an einer Synchronmaschine
  - 4.1. Messungen im Stillstand
    - 4.1.1. Der Durchschaltversuch
  - 4.2. Messungen nach dem Überdrehzahltest und im stabilen Leerlaufbetrieb
  - 4.3. Messungen nach der ersten Netzschaltung
5. Aufbau und Wirkungsweise eines Kompakt- Erregersystems
  - 5.1. Entstehung von Torsionspendellungen des Generatorläufers und deren Dämpfungsmöglichkeiten
6. Verfahren zur Zustandsbeurteilung von Wicklungsbaugruppen an Hochspannungsmaschinen
  - 6.1. Aufbau des Isolationssystems einer Hochspannungswicklung
  - 6.2. Messung des Isolationswiderstandes
  - 6.3. Verlustfaktor- oder  $\tan\delta$ - Messung
    - 6.3.1. Interpretation der Messwerte
  - 6.4. Teilentladungsmessung (TE)
7. Quellenverzeichnis

## 1. Physikalische Grundlagen der elektro- magnetischen Wechselwirkung und der daraus resultierenden Kraft

Zwischen einem fließenden elektrischen Strom und der Ausbildung eines magnetischen Feldes besteht eine physikalische, untrennbare Wechselwirkung.

Dabei ist es unbedeutend, ob dieser elektrische Strom in einem strukturierten metallischen Leiter in Form eines Kabels, oder in einem unstrukturierten Leiter in Form eines Bleches, Gehäuseteils oder anderer geometrischer Figuren fließt.

In jedem Fall bildet sich um diesen Stromkanal ein magnetisches Feld aus, dessen Feldlinien- Richtungen  $90^\circ$  zur Richtung des fließenden Stroms verlaufen.

Die vorstehende Wechselwirkung ist auch reversibel. Wenn ein Leiter einem magnetischen Wechselfeld ausgesetzt wird, so induziert das Magnetfeld in diesem Leiter eine Spannung, die bei Verbindung der beiden Leiterenden wieder zu einem Stromfluss führt. Dieser Stromfluss erzeugt seinerseits ebenfalls ein Magnetfeld, welches dem ursprünglichen Wechselfeld entgegenwirkt und somit eine Bewegungskraft entsteht, woraus sich bereits das grundsätzliche Wirkprinzip einer elektrischen Maschine erklärt.

In den verschiedenen Darstellungen der Wechselwirkungen zwischen dem elektrischen Strom und dem diesen umgebenden magnetischen Feldes

wird ausschließlich von der "Technischen Stromrichtung" ausgegangen, obwohl zwei gleichberechtigte Stromrichtungen in der Elektrophysik existieren.

Die "Technische Stromrichtung" beschreibt die Bewegung der positiven Ladungen und fließt vom Pluspol zum Minuspol.

Die "Physikalische Stromrichtung" beschreibt die Bewegung der negativen Ladungen (Elektronen) und geht vom Minuspol zum Pluspol.

Um nun die Wechselwirkung zwischen dem fließenden elektrischen Strom und dem ihn umgebenden Magnetfeld zu beschreiben, muss eine einheitliche zeichnerische Darstellung festgelegt werden. Geschichtsbedingt wurde dabei von der „Technischen Stromrichtung“ ausgegangen, deren Betrachtungsweise bis zur heutigen Zeit beibehalten wurde.

Die nachfolgenden Skizzen zeigen die Darstellungen.

Stromdurchflossener Leiter



Stromdurchflossener Leiter



Im linken Teil der vorstehenden Skizze ist die in einem runden Leiter fließenden Stromrichtung und die Richtung des dieses umgebenden Magnetfeldes dargestellt. Im allgemeinen Sprachgebrauch spricht man auch von der „Korkenzieher- Regel“.

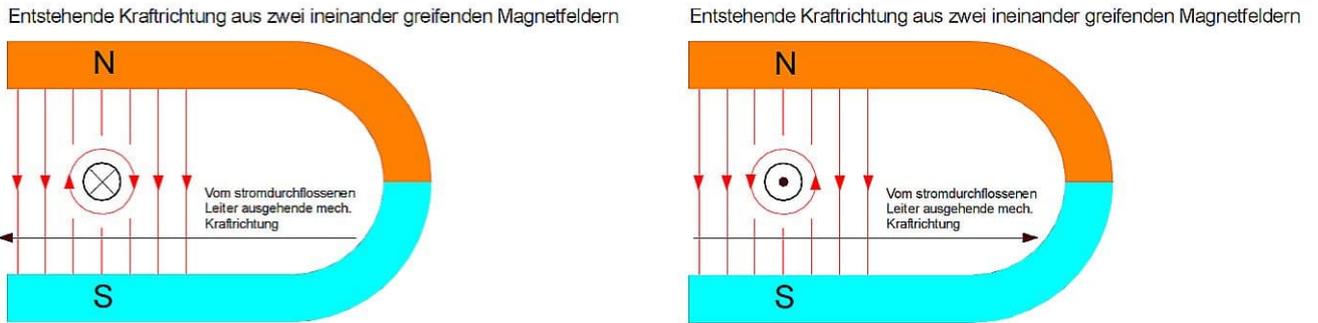
Das dargestellte „Kreuz“ symbolisiert das Federkreuz eines in die Blattoberfläche hineinfliegenden Pfeils.

Anders ausgedrückt, möchte man einen Korkenzieher in das Blatt hineindreihen, so muss die Drehrichtung rechtsherum sein und mit dieser Drehrichtung bildet sich auch das magnetische Feld aus.

Im rechten Teil der vorstehenden Grafik fliegt der Pfeil aus der Blattoberfläche heraus, so dass man in der Betrachtungsrichtung auf die Pfeilspitze schaut und deshalb, als Punkt markiert ist.

Möchte man den Korkenzieher aus der Blattoberfläche herausdrehen, so ist die Drehrichtung links herum und entspricht somit der Feldlinienrichtung, mit der das Magnetfeld den stromdurchflossenen Leiter umschließt.

Bringt man nun einen stromdurchflossenen Leiter mit seinem umgebenden Magnetfeld in ein anderes Magnetfeld hinein, so verbinden sich beide Magnetfelder zu einem resultierenden Magnetfeld, welches auf die Ursachen beider Magnetfelder eine mechanische Kraft auswirkt.

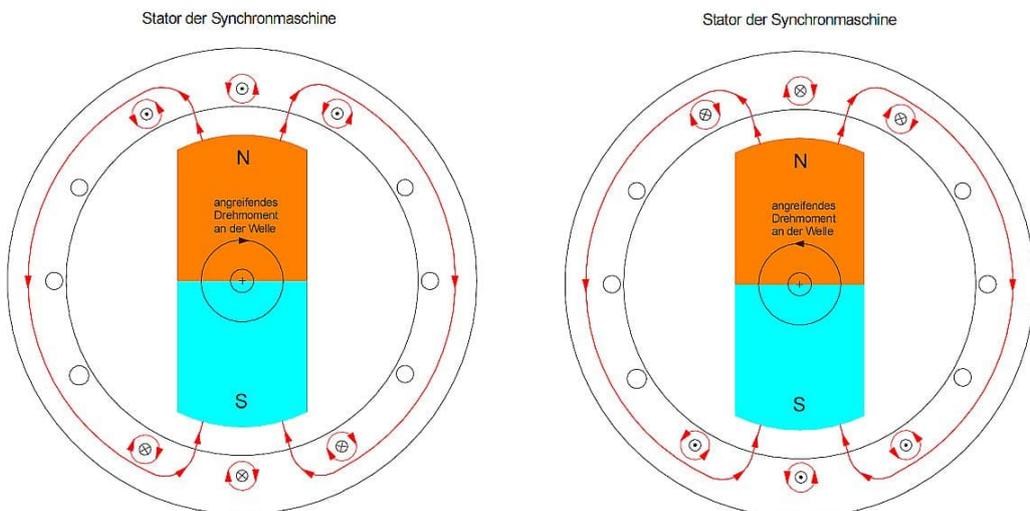


Die Ursachen beider Magnetfelder sind zum einen der hufeisenförmige Dauermagnet und der in dem Magnetfeld des Dauermagneten befindliche stromdurchflossene Leiter.  
 In der linken Grafik verlaufen die Magnetfeldrichtungen beider Felder, rechts vom stromdurchflossenen Leiter, jeweils in die gleiche Richtung, nämlich vom Nordpol zum Südpol. Dadurch kommt es auf dieser Seite zu einer Feldverdichtung. Links vom stromdurchflossenen Leiter sind die Richtungen beider Magnetfelder gegenläufig, so dass es auf dieser Seite zu einer Schwächung des Magnetfeldes kommt.  
 Durch die entstandene Feldverdichtung auf der rechten Seite und der Feldschwächung auf der linken Seite versucht das resultierende Feld einen Kraftausgleich herbeizuführen, indem es den Leiter in Richtung der Feldschwächung, also nach links verschieben möchte.

Die linke vorstehende Grafik zeigt die resultierende Bewegungsrichtung des stromdurchflossenen Leiters bei umgekehrter Stromrichtung.  
 In der Informationsquelle [1] ist dieses Verhalten nochmals als animierte Grafik dargestellt.

Schaltet man nun in jeder erreichten Endstellung des stromdurchflossenen Leiters die Stromrichtung um, so erreicht man eine permanente Bewegung des Leiters in einer Ebene, eigentlich bereits die erste Form eines elektrischen Antriebs, für den in der technischen Welt allerdings wenige Anwendungsbeispiele bestehen.

Werden jedoch mehrere Leiter in einer kreisrunden Struktur angeordnet, wie sie in jedem Stator einer Wechselstrom-Maschine zu finden sind und im Zentrum der Kreisstruktur einen drehbar gelagerten stabförmigen Dauermagneten, so bestehen zunächst die gleichen physikalischen Wechselwirkungen wie in den vorstehenden Skizzen mit dem Hufeisen-Magneten erläutert wurden. Werden nun die Stromrichtungen nach jeder halben Umdrehung des Stabmagneten umgeschaltet, ergibt sich daraus das einfachste Modell eines permanenten Synchron-Motors, der einmal mit Rechtslauf und einmal mit Linkslauf dargestellt wurde.



Eine **permanent** erregte Synchronmaschine ist jedoch in ihrer technischen Funktionsbreite relativ eingeschränkt. Zwar kann man an der Welle im motorischen Betrieb ein Drehmoment entnehmen oder im generatorischen Betrieb ein Drehmoment in die Welle einprägen, um eine gewisse Wirkleistung zu entnehmen oder zu erzeugen.

Allerdings erlaubt der konstante Magnetfluss eines Dauermagneten keine Variation der von diesem Magnetfeld induzierten Spannung in der Ständerwicklung.

Ein Angleich der Maschinenspannung an die Netzspannung wäre im Synchronisierungsfall nicht möglich.

Weiterhin sind im Netzparallelbetrieb die Netzspannung und die interne Generatorspannung direkt parallelgeschaltet.

Sind diese beiden Spannungen betrags- und phasengleich, so kann zwischen den beiden Spannungen kein Ausgleichsstrom fließen. Ist dieser „Ausgleichsstrom“ zur treibenden Spannung  $90^\circ$  phasenverschoben, handelt es sich deshalb um einen so genannten Blindstrom, multipliziert mit der treibenden Spannung um reine Blindleistung.

Ist die in der Generatorwicklung induzierte Spannung kleiner als die angelegte Netzspannung, wird ein Blindstrom bzw. eine Blindleistung vom Netz in die Synchronmaschine hineinfließen, (Blindleistungsbezug).

Im umgekehrten Fall fließt die Blindleistung aus der Synchronmaschine in das angeschlossene Netz, (Blindleistungslieferung).

Ist die in der Generatorwicklung induzierte Spannung gleich der Netzspannung, aber der Polwinkel zwischen den umlaufenden Ständerpolen und den gegenüberstehenden ungleichnamigen Läuferpolen positiv, d.h. der Läuferpol eilt dem Ständerpol voraus, so fließt eine reine Wirkleistung aus dem Generator in das Netz (generatorischer Betrieb).

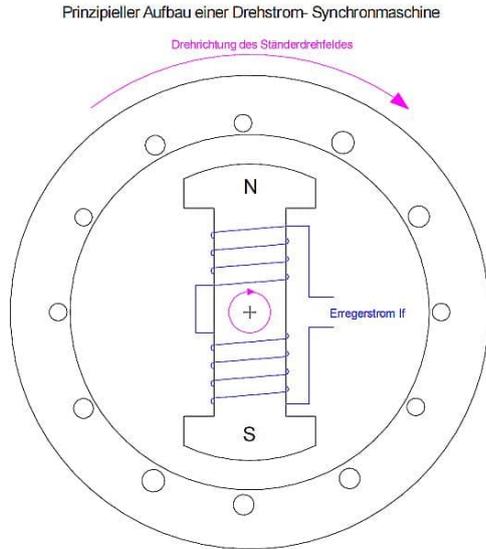
Im umgekehrten Fall, also bei nacheilenden Läuferpolen, fließt reine Wirkleistung vom Netz in die Synchronmaschine hinein (motorischer Betrieb).

*Merke: An einer Synchronmaschine kann die bezogene oder gelieferte Wirkleistung nur durch die Größe und Richtung des in die Welle eingebrachten Drehmomentes vorgegeben bzw. verändert werden.*

*An einer Synchronmaschine kann die bezogene oder gelieferte Blindleistung nur durch die Größe des von den Läuferpolen erzeugten Magnetflusses, also dem Erregerstrom vorgegeben bzw. verändert werden.*

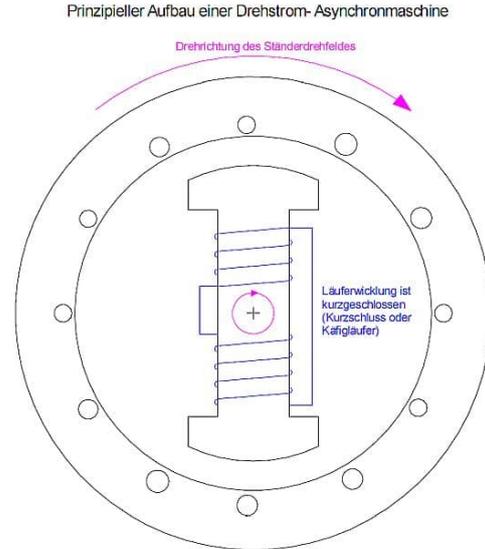
Aus den vorstehenden Zusammenhängen resultiert die Notwendigkeit, den anfänglichen Permanentmagnet- Läufer gegen einen, mit einer Erregerwicklung versehenen Läufer auszutauschen.

Nachfolgend die prinzipiellen Darstellungen einer Synchron- und Asynchronmaschine, deren Unterschiede nur in der Wicklungsart des Läufers bestehen.



### Prinzipdarstellung einer Synchronmaschine und deren Eigenschaften

- Die Läufer folgt synchron in Phase und Drehzahl dem Ständerdrehfeld.  
Die Drehzahl berechnet sich aus  
 $n = \text{Frequenz} \times 60 / \text{Polpaarzahl}$ .
- Bei  $P = 0$  stehen sich die ungleichnamigen Ständer- und Läuferpole direkt gegenüber.  
Zwischen den magnetischen Mittelpunkten der beiden Polflächen beträgt der Polwinkel  $0^\circ$ .
- Eine Synchronmaschine kann gleichzeitig und unabhängig voneinander Wirkleistung und Blindleistung mit unterschiedlichen Energieflussrichtungen liefern oder beziehen.
- Wird der Welle mech. Leistung entnommen (Motorbetrieb) verschieben sich die Mitten der Läuferpole entgegen der Drehrichtung zu den Ständerpolen, d.h. der Läufer eilt dem Ständerdrehfeld nach, aber immer noch mit synchroner Drehzahl.  
Der Polwinkel wird nacheilend und entspricht in seinem Wert der entnommenen Wirkleistung.
- Wird in die Welle mechanische Leistung eingebracht (Generatorbetrieb), verschieben sich die magnetischen Mitten der Läuferpole in Drehfeldrichtung zu den Mitten der jeweiligen Ständerpole, d.h. die Läuferpole eilen den Ständerpolen voraus, aber immer noch synchron.  
Der Polwinkel wird voreilend und entspricht in seinem Wert der erzeugten Wirkleistung.
- Die Wirkleistung einer Synchronmaschine wird durch Richtung und Größe des in die Welle eingebrachten Drehmomentes und die Blindleistung durch den Betrag des Erregerstroms bestimmt.
- Eine Synchronmaschine kann ein eigenständiges Netz aufbauen und ist daher inselfähig.



### Prinzipdarstellung einer Asynchronmaschine und deren Eigenschaften

- Die Läuferpole folgen nicht in Phase und Drehzahl dem Ständerdrehfeld, sondern eilen diesem mit der Schlupffrequenz nach. Die Drehzahl ist daher kein konstanter Wert, sondern richtet sich im motorischen Betrieb nach der entnommenen Wellenleistung.
- Eine Asynchronmaschine kann Wirkleistung beziehen und erzeugen, aber nur Blindleistung beziehen, daher ist der Leistungsfaktor von der Wirkleistung abhängig und kann von der Maschine nicht variiert werden.
- Wird der Welle mech. Leistung entnommen (Motorbetrieb), verringert sich die Läuferdrehzahl, so dass die Schlupffrequenz ansteigen muss, um einen größeren Strom in der kurzgeschlossenen Läuferwicklung induzieren zu können.
- Um in den generatorischen Betrieb zu gelangen, muss die Läuferdrehzahl in den übersynchronen Bereich verschoben werden. Damit entsteht wieder eine Schlupffrequenz, jedoch mit umgekehrten Vorzeichen. Die dabei generierte Wirkleistung ist dabei, wie im Motorbetrieb, der Schlupffrequenz proportional.
- in beiden Betriebsarten, motorisch oder generatorisch bezieht die Asynchronmaschine die zur Erhaltung des internen magnetischen Feldes erforderliche Blindleistung aus dem Netz.
- Eine Asynchronmaschine benötigt in jedem Fall ein Netz und ist daher nicht inselfähig.

2. Ausführungsformen von Innenpol- Synchronmaschinen

Daraus ergibt sich nun die Frage, wie kommt der von außen zugeführtem Erregerstrom in die Feldwicklung des rotierenden Läufers der Synchronmaschine?

Die ursprüngliche und älteste Möglichkeit besteht darin, den Generatorläufer mit Schleifringen zu versehen und darüber den Erregerstrom in die Läuferwicklung zu leiten.

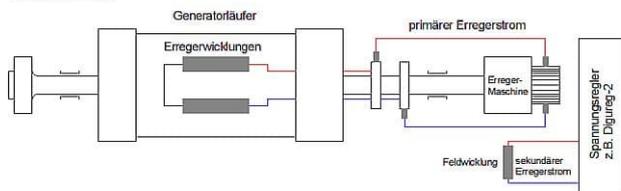
Bei Maschinen größerer Leistungen, z.B. so genannten Grundlastmaschinen in Kernkraft- und Kohlekraftwerken können die Erregerströme Werte von mehreren tausend Ampere annehmen. Um derartige Ströme in die rotierende Erregerwicklung zu übertragen, sind enorme Mengen einzelner Kohlebürsten erforderlich, die ständig auf ihren Abrieb, im Betrieb der Maschine kontrolliert werden müssen. Zusätzlich erfolgt eine enorme Verschmutzung des Maschinenhauses durch den Belag des Bürstenabriebs.

Mit zunehmenden Entwicklungsstand der Halbleiter- Gleichrichter- Technik ist man dazu übergegangen, den Kommutator der ehemaligen Erregermaschine durch eine, mit diesem rotierende mehrpolige Drehstrombrücken zu ersetzen und den Erreger-Gleichstrom durch eine, teilweise hohlgebohrte Läuferwelle direkt von der rotierenden Gleichrichterbrücke zur Erregerwicklung des Läufers zu leiten.

Damit ist keine „schleifende“ Stromverbindung im gesamten Erregerkreis mehr notwendig, d.h. der Läufer des gesamten Turbosatzes ist damit wartungsfrei und auch eine Verschmutzung durch Bürstenabrieb ist damit beseitigt.

In den nachfolgenden Skizzen werden prinzipiell die drei Möglichkeiten zur Übertragung des Erregerstroms in die rotierende Läuferwelle dargestellt.

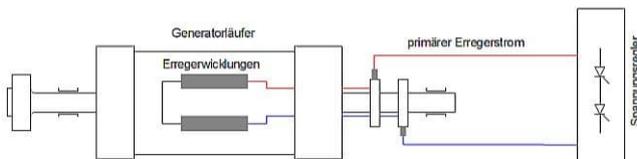
Variante 1



Erregung durch Gleichstrom- Kommutatormaschine

- Vorteile:
- Gute Regelbarkeit
  - Hohe Regeldynamik durch kurze Entregungszeiten, durch Gegenerrregung.
- Nachteile:
- Hoher Wartungsaufwand, regelmäßige Kontrollen des Bürstenverschleißes erforderlich
  - Starke Verschmutzung des Maschinenhauses durch Bürstenabrieb.
  - Zyklische Kontrolle der Bürsteneinstellungen wie "Neutrale Zone" und Kommutierungs-Charakteristik.

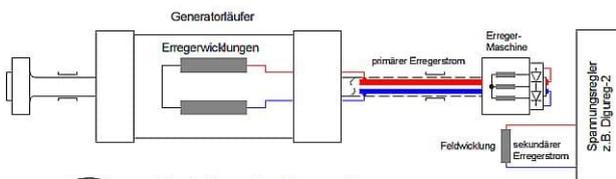
Variante 3, so genannte Statische Erregung



Erregung durch „Statische Erregereinrichtungen“

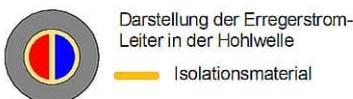
- Vorteile:
- Hohe Regeldynamik erreichbar. Einsetzbar in Anlagen mit Stoßbelastung wie Walzwerken usw.
  - Kurze Auf- und Entregungszeiten möglich, da die Thyristorbrücke im Gleich- und Wechselrichterbetrieb arbeiten kann.
- Nachteile:
- Geringer bis mittlerer Wartungsaufwand durch regelmäßige Kontrollen des Bürstenverschleißes erforderlich
  - Mittlere Verschmutzung des Maschinenhauses durch Bürstenabrieb.

Variante 2, so genannte RG- Erregung (RG = Rotierende Gleichrichter)



Bürstenlose Erregung durch Rotierende Gleichrichter

- Vorteile:
- Nahezu wartungsfreier Betrieb, da keine aneinander schleifenden Baugruppen wie Kohlebürsten vorhanden sind.
  - Langfristige Wartungsintervalle möglich.
  - Keine zusätzliche Verschmutzung des Maschinenhauses
- Nachteile:
- Geringe Regeldynamik durch Addition der Zeitkonstanten von Generator und Erregermaschine.
  - Maschine eignet sich nur im Grundlastbetrieb, wo keine großen und schnellen Regelhübe erforderlich sind.



Die vorstehenden Skizzen zeigen alle Komponenten eines Turbosatzes, einschließlich der verschiedenen Erregervarianten. Um diese Turbosätze hinsichtlich ihrer Leistungsparameter zu klassifizieren, berechnet der Maschinenhersteller anhand der geometrischen und konstruktiven Details, die technischen Daten der einzelnen Maschinen, welche ein Projektant benötigt, um für einen bestimmten Aufstellungsort die geeignete Maschinengröße zu bestimmen.

Grundsätzlich gehören dazu die Nennspannung, der Nennstrom, die Nennscheinleistung, der Nennleistungsfaktor, die Nennfrequenz und die Erregernennwerte, die auf einem Leistungsschild sichtbar an der Maschine angebracht werden müssen. Weiterhin die wichtigsten Zeitkonstanten und Reaktanzen.

### 3. Maschinendiagramme und Kennlinien

Zur Maschinendokumentation des Herstellers gehören auch entsprechende Kennlinien und Diagramme, die bestimmte Abhängigkeiten zwischen einzelnen oder mehreren Variablen darstellen. Zu den wichtigsten Diagrammen gehören die Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie und das Generatorleistungsdiagramm. Diese beiden Diagramme sowie die technischen Daten des Turbosatzes müssen bei jeder Inbetriebnahme vorliegen, damit der Turbosatz während der Inbetriebnahme an die Daten der Bestandsanlage angepasst werden können.

#### Hinweis:

Leider nimmt der Generatorhersteller die Leerlauf- und Kurzschlusskennlinien seiner Maschinen nur über dem "primären Erregerstrom" auf.

Im Fall eines bürstenlosen Turbosatzes, bei dem der primäre Erregerstrom durch die Hohlwelle geleitet wird, ist der primäre Erregerstrom nicht mehr zugänglich und kann somit auch nicht mehr gemessen werden.

Sollte der Kunde aber auf die Anzeige dieses Stromes bestehen, kann durch zusätzlichen Einbau einer „Querfeldspule“, dieser primäre Erregerstrom wieder berührungslos gemessen werden.

Was eine Querfeldspule ist und wie diese funktioniert, kann unter der Quellenangabe [2] auf meiner Internetseite nachgelesen werden.

Bei einem bürstenlosen Turbosatz ist es daher umso wichtiger, dass die beiden Kennlinien während der Inbetriebnahme auch über den "sekundären Erregerstrom" aufgenommen werden.

Sollte sich im Verlauf der langjährigen Betriebszeit die Vermutung erhärten, dass im Generatorläufer möglicherweise ein Windungsschluss vorliegt, kann dieser am flacher verlaufenden Anstieg, der erneut aufzunehmenden Kurzschlusskennlinie, über dem sekundären Erregerstrom detektiert werden.

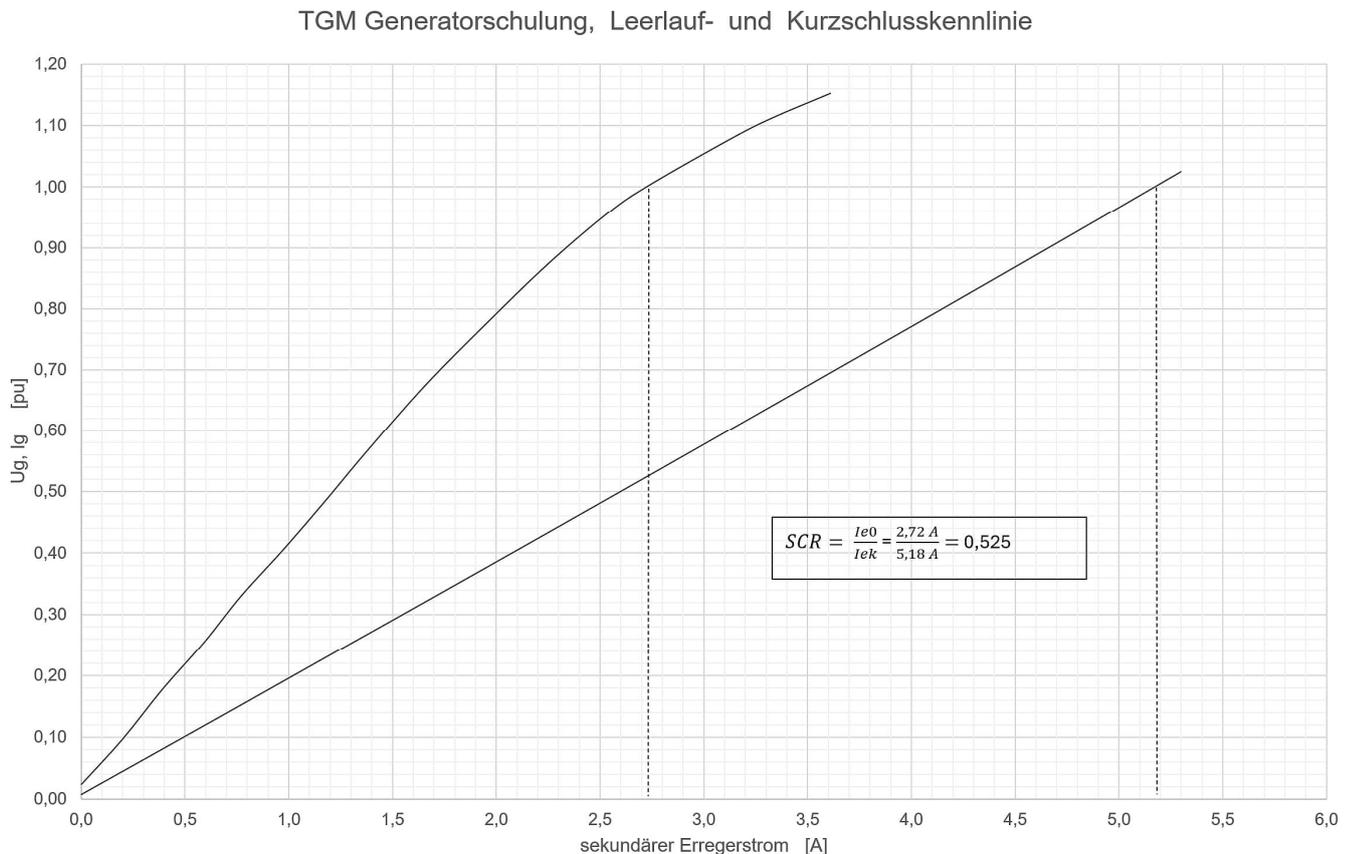
Das nachfolgende Diagramm zeigt die während der Inbetriebnahme aufgenommenen Leerlauf- und Kurzschluss- Kennlinien eines Elin- Turbosatzes mit folgenden Leistungsdaten:

Generator: 10500 V, 823 A, 14,97 MVA, S1,  $\cos\phi = 0.8$ , 50 Hz, Erregung: 326 V, 246 A,  
xd: 1.8430 / 2.0872, xq: 1.7509 / 1.9829, xd': 0.2042 / 0.2150, gesättigt / ungesättigt

Erregermasch.: 326 V, 236 A, 80,3 kW, Erregung: 65.2 V, 9.8 A

Wie im Diagramm erkennbar, ist es sinnvoll, die gemessenen Strom- und Spannungswerte als pu- Werte an den jeweiligen Nennwerten zu relativieren, damit erstens nur eine vertikale Skala erforderlich ist und zweitens eine bessere optische Übersicht über den Nenndatenbereich.

### 3.1. Die Kurzschluss- und Leerlaufkennlinie



Das vorstehende Diagramm wurde also über dem so genannten "sekundären Erregerstrom" aufgenommen. Sollte im Verlauf der Betriebszeit des Turbosatzes ein Windungsschlussverdacht im Generator- Läufer auftreten, wird eine erneut aufgenommene Kurzschlusskennlinie, als Indiz für einen Windungsschluss, die Steigung der Kurzschlusskennlinie flacher verlaufen.

Weiterhin kommt es durch die entstehende "magnetische Unwucht" zum Anstieg des drehfrequenten Schwingungsanteils an den Generatorlagern.

Daher sollten bei jeder Neuinbetriebnahme diese Kennlinien als Referenzwerte für spätere Analysen in jedem Fall aufgenommen werden.

Weiterhin kann aus den beiden Kennlinien das Leerlauf- Kurzschluss- Verhältnis mit der Kurzbezeichnung  $K_c$  (deutsch) und SCR (englisch) berechnet werden.

Diese Variable beinhaltet unter anderem Informationen zur magnetischen Geometrie innerhalb des Generators und entspricht mit seinem Kehrwert  $1/K_c$  näherungsweise der gesättigten synchronen Längsreaktanz  $x_d$ .

Dazu nachfolgendes Berechnungsbeispiel mit den obigen technischen Daten der ELIN- Maschine:

Von ELIN vorgegebener Wert:  $x_d = 1.8430$ , daraus ergibt sich  $1/x_d = 0,542$ , aus den vorstehenden Kennlinien berechneter SCR- Wert = **0,525**

Die SCR- Werte aus der ELIN- Doku. und der berechnete SCR- Wert aus den Kennlinien sind zwar nicht absolut identisch, aber sehr ähnlich.

Die geringe Differenz resultiert vermutlich aus Messungenauigkeit bei der Kennlinien- Aufnahme.

### *Wozu braucht man das eigentlich alles??*

Bei der Inbetriebnahme von älteren Bestandsanlagen im Rahmen einer Retrofit- Maßnahme kommt es häufig vor, dass beim Kunden nur noch eine eingeschränkte oder gar keine Original- Dokumentation vorhanden ist.

Ohne den ungefähren Wert des Leerlauf- Kurzschluss- Verhältnisses oder den korrekten  $x_d$ - Wert zu kennen, kann kein Leistungs- Diagramm der Synchronmaschine nachempfunden werden und daher keine exakte Einbindung der Retrofil- Komponenten in eine Bestandsanlage erfolgen.

### 3.2. Das Leistungs- Diagramm, oder auch P/Q- Diagramm

Das Leistungsdiagramm einer Synchronmaschine ist das wichtigste und in seinem Informationsgehalt das vielfältigste Diagramm.

Es sollte daher in jeder Schaltwarte, zur Einschätzung des momentanen Betriebspunktes der Maschine und Übersicht über den noch verfügbaren Leistungs- Spielraum, sichtbar für das Betriebspersonal angebracht werden.

Da eine Synchronmaschine vier unterschiedliche Betriebszustände einnehmen kann, besteht ein komplett gezeichnetes Leistungsdiagramm auch aus vier Sektoren.

Diese sind:

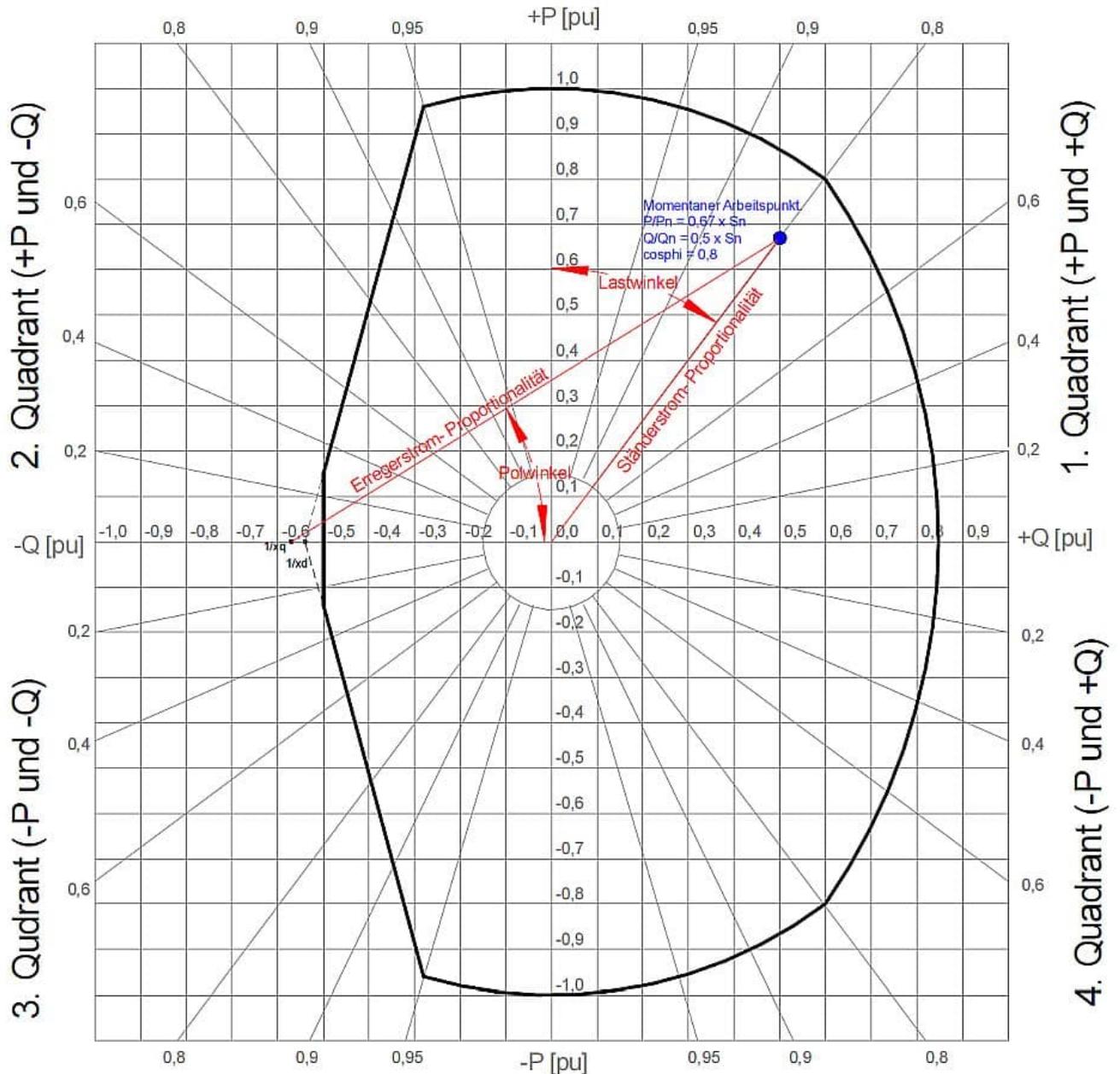
- Sektor 1: Wirkleistungs- Lieferung (+P) und Blindleistungs- Lieferung (+Q), Leistungsfaktor induktiv
- Sektor 2: Wirkleistungs- Lieferung (+P) und Blindleistungs- Bezug (-Q), Leistungsfaktor kapazitiv
- Sektor 3: Wirkleistungs- Bezug (-P) und Blindleistungs- Bezug (-Q), Leistungsfaktor kapazitiv
- Sektor 4: Wirkleistungs- Bezug (-P) und Blindleistungs- Lieferung (+Q), Leistungsfaktor induktiv

Die Vorzeichen- Bewertung für Lieferung und Bezug sind leider nicht einheitlich geregelt. So ist es im Anlagenbau üblich, gelieferte Energiefluss- Richtungen mit Minus und bezogene Energieflussrichtungen mit Plus zu bezeichnen.

In der Energie- Erzeugung werden gelieferte Energieflussrichtungen jedoch mit Plus und bezogene Energieflussrichtungen mit Minus bezeichnet.

Für jedes Gewerk betrachtet, ist das zunächst kein Problem. Wenn aber beispielsweise zwischen beiden Gewerken Analogwerte ausgetauscht werden müssen, wie beispielsweise der Generatorregelung an der Netzübergabestelle, treten zunächst erst einmal Definitionsprobleme auf.

Die nachfolgende Skizze zeigt das vollständiges Leistungsdiagramm einer Synchronmaschine mit seinen vier Quadranten.



Im vorstehenden Leistungs- oder P/Q- Diagramm sind alle Quadranten dargestellt, die eine Synchronmaschine bedienen bzw. als Betriebspunkt einnehmen kann.

Der Maschinenhersteller gestattet, die gesamte, von der schwarzen Linie umrahmte Fläche als Betriebsbereich der Maschine im Bedarfsfall zu benutzen.

Das Bild zeigt weiterhin einem momentanen Arbeitspunkt der Synchronmaschine im übererregten generatorischen Bereich, mit einem Leistungsfaktor von  $\cos\phi = 0,8$  ind., den Polwinkel  $\alpha$ , und die Kehrwerte der synchronen Längs- und Querreaktanzen.

Weiterhin besteht eine sofortige Übersicht über den aktuellen Betriebszustand der Maschine mit folgender Orientierungen:

- Läuft die Maschine übererregt oder untererregt, bzw. wird evtl. bereits Blindleistung aus dem Netz bezogen.
- Wieviel Platz besteht noch bis zum Ansprechen der Rückleistung- Anregung.
- Wieviel Platz besteht noch bis zum Ansprechen der Nenndatenbegrenzung ( $I_e$ ,  $I_g$ , UNE und Rückleistung).

Es ist jedoch nicht üblich, dass ein Maschinenhersteller ein Leistungsdiagramm in der Vier- Quadranten- Darstellung mit seiner Maschine ausliefert.

Wenn beispielsweise ein Generator für eine Antriebsmaschine bestellt wird, besteht das mitgelieferte Leistungsdiagramm nur aus den Quadranten 1 und 2, da die Maschine niemals in den motorischen Betrieb der Quadranten 3 und 4 betrieben wird.

#### 4. Erforderliche Messungen vom Stillstand bis zum Netzparallelbetrieb an einer Synchronmaschine

Nachfolgend möchte ich zum Thema Inbetriebnahme und Aufnahme des Netzparallelbetriebes einer Synchronmaschine einige Ausführungen machen und welche Messungen dabei in jedem Fall ausgeführt werden sollten

##### 4.1. Messungen im Stillstand bzw. im RDV- Betrieb

- Kontrolle der am Generator angeschlossenen Leittechnik, wie Schwingungssensoren und Temperatursensoren.
- Kontrolle von evtl. vorhandenen Kohlebürsten, LES oder vorhandene Schleifringe.
- Kontrolle von Stillstands- Heizungen und Messung der entsprechenden Stromaufnahmen.
- Sofern gewünscht, Messung der Isolationswiderstände der zugängigen Wicklungsbaugruppen
- Kontrolle der energetischen Anschlusskabel zwischen Generator und Schaltanlage und korrekter Führung der Schirmerden bei evtl. vorhandenen Kabelumbauwandlern.
- Anschlusskontrolle des Erregersystems an die Feldwicklung und der vorhandenen Strom- und Spannungswandler.
- Durchschaltversuch zum korrekten Funktionsnachweis der Parallelschalteneinrichtung.
- Einbau einer dreipoligen, nennstromfesten Kurzschlussverbindung an der Generatorausleitung, jedoch außerhalb des Differentialschutz- Kreises.
- Kontrolle des Rotor- Erdschluss- Schutzes

##### 4.1.1. Der Durchschaltversuch

Was ist eigentlich ein Durchschaltversuch und welche Informationen gewinnt man daraus?

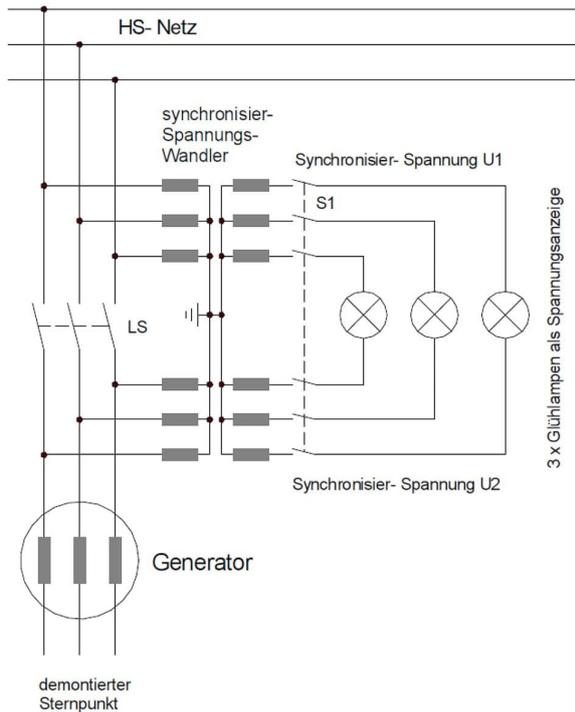
Eine auf Nenndrehzahl befindliche und erregte Synchronmaschine generiert ein dreiphasiges Spannungssignal mit dem Wert der auf ihrem Leistungsschild ausgewiesenen Nennspannung, die an der Unterseite des Synchronisier- Leistungsschalters ansteht.

Auf der Oberseite dieses Schalters steht ebenfalls die dreiphasige Netzspannung an. Um eine stoßfreie Parallelschaltung der Synchronmaschine mit dem Netz zu ermöglichen, müssen über den Schalterkontakten des Synchronisier- Leistungsschalters im Moment des Einschaltens, die Parallelschalt- Bedingungen  $\Delta U = 0 \text{ V}$ ,  $\Delta f = 0 \text{ Hz}$  und  $\Delta \alpha = 0^\circ$ , vorhanden sein.

Das Problem bei der Prüfung der Parallelschaltbedingungen besteht nun darin nachzuweisen, wenn die Parallelschaltbedingungen auf der Hochspannungsseite des Leistungsschalters vorhanden sind, diese auch auf der Niederspannungsseite der Spannungswandler entsprechend wiedergegeben werden.

Dazu werden auf der HS- Seite, durch Schließen der Schalterkontakte des Synchronisier- LS, die vorstehenden Parallelschaltbedingungen erzwungen und auf der NS- Seite der synchronisier- Spannungswandler, die wiedergegebenen Parallelschaltbedingungen kontrolliert.

Mit der nachstehenden Schaltung wurde auf einfachste Weise dargestellt, wie jeder Inbetriebnehmer,, ohne Internet und Telefonverbindung, auch auf der entferntesten Baustelle, beim Versagen der Originalinstrumentierung, ein Durchschaltversuch und anschließend eine Parallelschaltung einer Synchronmaschine sicher mit dem Netz durchführen kann.



Wird der Leistungsschalter (LS) in der nebenstehenden Skizze, bei demontiertem Generatorsternpunkt eingeschaltet, so steht die Sammelschienenspannung bis an den Generatorsternpunkt an, daher nach der Sternpunkt demontage den Generatoranschlusskasten wieder schließen und vor Berührung schützen.

*In diesem Schaltzustand werden die Parallelschalt-Bedingungen auf der HS- Seite erzwungen.*

Gleichzeitig werden von den Spannungswandler- Gruppen die Synchronisier- Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  auf der 100 V Seite generiert.

Bei ebenfalls eingeschalteten Freigabeschalter (S1) für die Synchronisier- Spannungen, stehen diese auch an den Glühlampen an.

Bestehen nun die Parallelschalt- Bedingungen  $\Delta U = 0 \text{ V}$ ,  $\Delta f = 0 \text{ Hz}$  und  $\Delta \alpha = 0^\circ$  auch auf der NS- Seite der Wandler, müssen alle drei Glühlampen vollkommen „dunkel“ sein. Bei Phasen- und Polaritätsfehlern können einzelne Lampen mehr oder weniger hell leuchten.

Wurden beim Durchschaltversuch die Parallelschalt- Bedingungen auf der HS- und NS- Seite bestätigt, kann die Synchronmaschine erstmals mit dem Netz parallelgeschaltet werden.

Bei wieder montierten Generatorsternpunkt und erregter Maschine beginnen alle drei Lampen **zeitgleich** ihre Helligkeit zu verändern, abhängig von der Differenzfrequenz zwischen Generator und Netz.

Im Moment, indem alle drei Lampen vollständig erloschen sind, kann der Synchronisier- Leistungsschalter gefahrlos eingeschaltet werden.

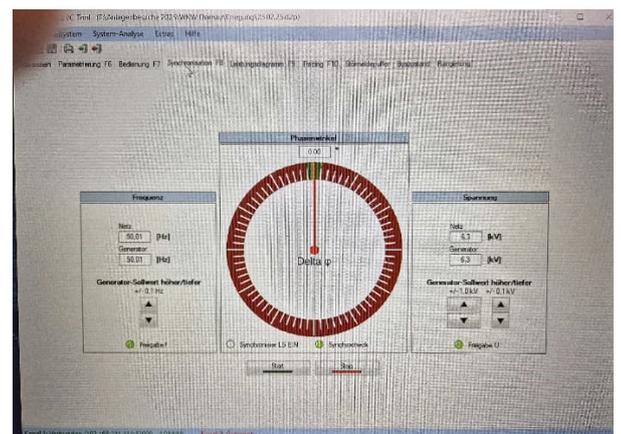
Die meisten Hersteller leittechnischer Baugruppen bieten beispielsweise etwas anspruchsvollere Geräte als vorstehend beschrieben an, wie beispielsweise Doppel- Frequenz und Doppel- Spannungsmesser, sowie entsprechende Synchrocheck- Geräte an. Auch zusätzlich benötigte Parallelschaltgeräte, die den LS- Ein- Impuls generieren, werden auf dem Markt in vielfältiger Zahl angeboten.

Nachfolgend ein Foto, welches den korrekten Zustand der Parallelschaltbedingungen während des Durchschaltversuches an einem Wasserkraft- Generator zeigt.



Das links abgebildete Synchrocheck- Gerät zeigt keine Phasendifferenz und der rechts abgebildete Doppelspannungsmesser keine Spannungsdifferenz zwischen den Synchronisier- Spannungen an.

Das im Rechten Bild dargestellte Parallelschaltgerät zeigt alle drei Parallelschaltbedingungen an und würde in diesem Zustand einen Ein- Impuls an den Leistungsschalter senden.



4.2. Messungen nach dem Überdrehzahltest und im stabilen Leerlaufbetrieb.

- Aufnahme der Leerlauf- und Kurzschluss- Kennlinie sowie des Differentialstroms im Schutzgerät.
- Optimierung des im Erregersystem vorhandenen Spannungsreglers und Aufnahme der Systemantworten des Erregersystems und der Synchronmaschine auf bestimmte Sollwertsprünge.
- Primärprüfung ausgewählter strom- und spannungsrelevanter Schutzfunktionen wie SES, LES und Differentialschutz.

4.3. Messungen nach der ersten Netzschaltung des Turbosatzes.

- Messung der so genannten Schleppleistung bei geschlossenen Turbinen- Regelventilen und Parametrierung des Rückleistungsschutzes.
- Kontrolle der vom Erreger- und Schutzsystem berechneten Energieflussrichtungen, bei Lieferung müssen alle Werte mit positiven Vorzeichen angezeigt werden.
- Kontrolle der leistungsrelevanten Regler und Funktionen im Schutz- und Erregersystem.
- Funktionskontrolle der im Erregersystem vorhandenen  $I_e$ -,  $I_g$ - und UNE- Begrenzungsfunktionen.

Damit endet prinzipiell die Schulung über den Aufbau und die Wirkungsweise einer Synchronmaschine.

Im weiteren Verlauf möchte ich einige Erläuterungen und Funktionserklärungen zum Kompakterregersystem Digureg-2 geben.

## 5. Aufbau und Wirkungsweise eines Kompakt- Erregersystems

Auf den vorstehenden Seiten wurde versucht, die Funktion einer Synchronmaschine in verständlicher Weise, ohne aufwendige Zeigerdiagramme und Formeln der höheren Mathematik zu erklären und warum die Läuferwicklung mit einem, von außen eingespeistem Erregerstrom versorgt werden muss.

Dieser Erregerstrom dient nicht nur dazu, im Luftspalt der Maschine, zwischen Stator- und Läufer- Blechpaket, ein magnetisches Feld zu erzeugen,

Größe und Richtung dieser magnetischen Induktion werden auch dazu benutzt, bestimmte Betriebsarten der Synchronmaschine mit ihren jeweiligen Betriebspunkten zu ermöglichen und diese stabil zu halten.

Das Erregersystem enthält somit nicht nur einen sogenannten Spannungsregler, sondern diesem überlagert, weitere Regler, die das Regeln der Blindleistung und des Leistungsfaktors an der Generatorklemme sowie auch an der Netzzeispeisestelle ermöglichen.

Weiterhin sind im Software- Algorithmus des Erregersystems Begrenzungsfunktionen für den Erregerstrom, den Ständerstrom und die Untererregung sowie ein so genanntes Pendeldämpfungsgerät PDG, in Neudeutsch auch PSS genannt, vorhanden. Alle, die vorstehend aufgeführten Funktionen eines Erregersystems müssen während der Inbetriebnahme optimiert und deren korrekte Funktionen durch Aufzeichnen der Systemantworten auf Sollwertsprünge getestet und nachgewiesen werden.

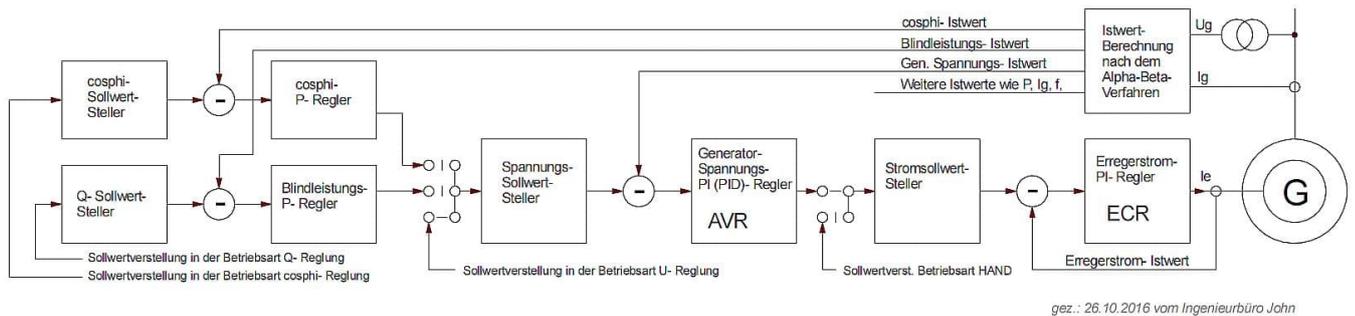


Das nebenstehende Foto zeigt ein so genanntes Kompakterregergerät der Firma Siemens zur Generierung eines, so genannten sekundären Erregerstrom bis 16 A. Alternativ gibt es dieses Gerät auch mit einem größeren Leistungsteil bis 35 A. Damit können RG- Turbosätze auch im mittleren Leistungsbereich von  $\geq 60$  MVA erregt werden.

Auch andere Mitanbieter wie ABB oder Basler haben so genannte Kompakterregergeräte mit gleichem Funktionsumfang in ihrem Angebotsprogramm, die aber deutlich weniger binäre und vor allen Dingen analoge Schnittstellen aufweisen. Damit stellt der Digureg eine willkommene Besonderheit bezüglich der Anwendungsvielfalt bzw. Anpassungsmöglichkeiten an Kundenwünsche dar.

Eine umfassendere Beschreibung des Kompakt- Erregergerätes kann beispielsweise in der angegebenen Informationsquelle [5] nachgelesen werden.

Eine umfassendere prinzipielle Übersicht über die im Software- Algorithmus integrierten Funktionen soll das nachfolgende Strukturbild ermöglichen. Dabei sind nur die Regelfunktionen der anzuwählenden Betriebsarten dargestellt. Die Begrenzungsfunktionen und das Pendeldämpfungsgerät sowie die cosphi- und Q- Regelung an der Netzübergabestelle sind dazu separate Strukturblöcke und wurden wegen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.



Spezifikationen der Schnittstellen und Begrenzungsfunktionen des Kompakterregersystems Digreg-2

Analoge Istwert- Eingänge: - Dreiphasiger Spannungs- Istwert von den Spannungswandlern, Bereich: 100 V – 120 V  
 - Dreiphasiger Strom- Istwert von den Stromwandlern, Bereich: 1 A – 5 A

Analoge Steuereingänge: - 4 Stück, freie Zuordnung verschiedener. extern. Variablen, wie Leistungen an der Netz-  
 Übergabestelle, oder Einspeisung eines PSS- Störgröße zur Optimierung des PDG,  
 Bereich: 0/4 – 20 mA

Analoge Ausgänge: - 8 Stück, freie Zuordnung verschiedener interner Variablen, Bereich: 0/4 – 20 mA

Kommunikations- Schnittstellen: - 1 x Profibus über 9 polige Sub-D Buchse  
 - 1 x Profinet über Ethernet- Buchse, dieser Eingang ist mit einer Switch- Funktion über 2 Ethernet- Eingangsbuchsen realisiert.

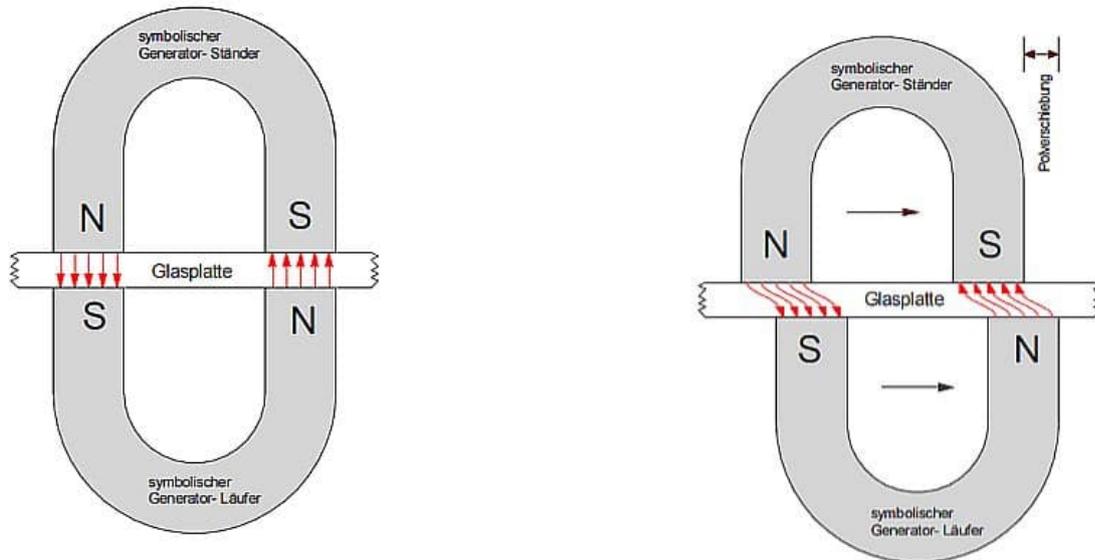
Begrenzungsfunktionen:

- Begrenzungen der Sollwerte aller Betriebsarten durch Vorgabe der min. und max. Stellgrenzen.
- Begrenzungen der Sollwerte aller Betriebsarten durch Vorgabe der min. und max.
- Begrenzung des Leerlauferregerstroms bei GLS ist aus (unverzögert wirksam).
- Begrenzung des Erregerstroms bei GLS ist ein (Aufladung eines thermischen Modells).
- Begrenzung des Ständerstroms (Aufladung eines thermischen Modells).
- Begrenzung der Untererregung sofort wirkend bei Annäherung an die statische Stabilitätsgrenze der Synchron- Maschine.
- Begrenzung der Übererregung U/f
- Dämpfung der Rotor- Torsionspendelungen bei plötzliche Wirklast- Änderungen (PSS)

5.1. Entstehung von Torsionspendelungen des Generatorläufers und deren Dämpfungsmöglichkeiten

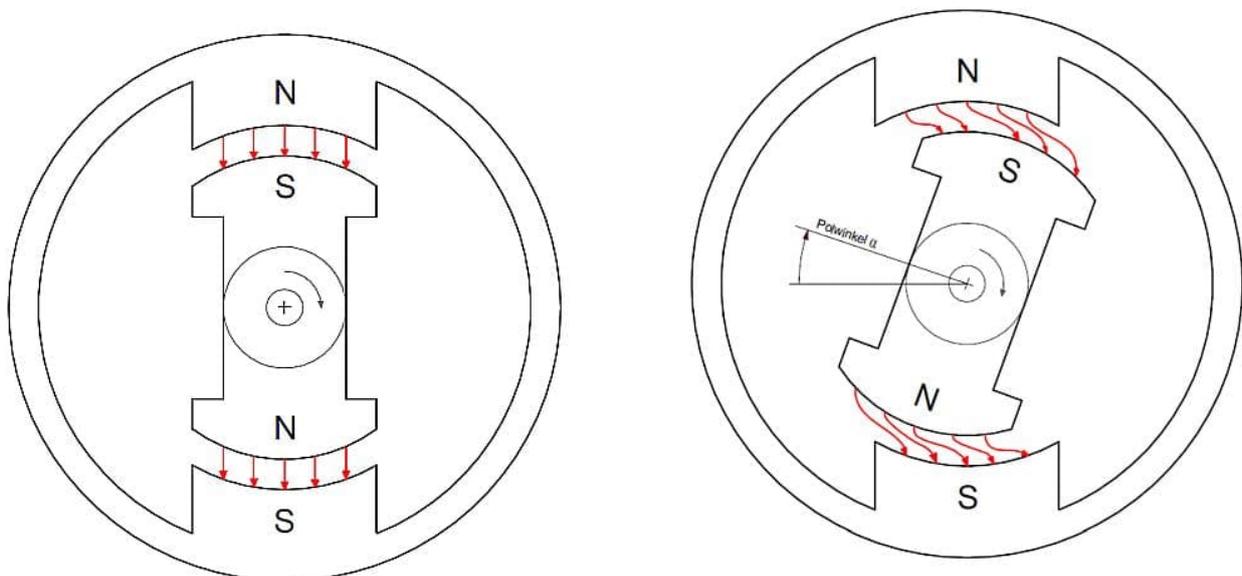
Da in den vorstehenden Beschreibungen wiederholt die Begriffe PDG (**P**endel- **D**ämpfung- **G**erät) oder PSS (**P**ower- **S**ystem- **S**tabilizing) vorgekommen sind, möchte ich nachfolgend versuchen, die physikalischen Vorgänge und Zusammenhänge, die sich hinter diesen Begriffen verbergen, zu erklären.

Hält man zwei Hufeisenmagneten gegenpolig, getrennt durch ein dünnes nichtmagnetisches Material, zusammen, so ziehen sich diese gegeneinander an.



Versucht man nun beide Magneten horizontal gegeneinander zu verschieben, muss man eine „Verschiebekraft“ aufbringen, die gegen die magnetische „Rückholkraft“ wirkt. Um die im rechten Bild dargestellte Position beider Magneten beizubehalten, ergibt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen der horizontal angreifenden Verschiebekraft und der magnetischen Rückholkraft.

Verlagert man das vorstehende Beispiel in eine rotationssymmetrische Ebene, ergeben sich die gleichen physikalische Abhängigkeiten.



Im linken Bild bewirkt die magnetische Zugkraft, dass sich die geometrischen Mitten beider Polflächen der jeweiligen ungleichnamigen Ständer und Läuferpole deckungsgleich gegenüberstehen.

Bringt man nun in die Welle ein mit rechtem Drehsinn wirkendes Drehmoment ein, so werden die Feldlinien im Maschinen-Luftspalt gedehnt, ähnlich einem Gummiband und es entsteht ebenfalls eine magnetische Rückholkraft.

Wie im Beispiel mit dem Hufeisenmagneten bleibt der dargestellte Zustand nur erhalten, wenn die vom Erregerstrom abhängige magnetische Rückholkraft genauso groß ist, wie das eingebrachte Drehmoment.

*Daraus ergibt sich schon die Aussage, dass man die Rückholkraft und den Verdrehungswinkel, bei gleichem, in die Welle eingebrachtem Drehmoment, beeinflussen kann.*

Aus den vorstehenden Ausführungen zur Funktion einer Synchron- Maschine wissen wir auch, dass der Polwinkel  $\alpha$ , der aufgenommenen oder abgegebenen Wirkleistung proportional ist.

Das bedeutet, dass bei jeder Wirklaständerung sich auch der Polwinkel ändern muss.

Schreibt man nun die Wirkleistung einer Synchronmaschine mit einem Transienten- Rekorder über der Zeit, so gibt dieser Schrieb nicht nur die momentane Wirkleistung, sondern auch das proportionale Verhalten des Polwinkels  $\alpha$  wieder.

Da der Wellenstrang eines Turbosatzes nicht trägheitslos ist, sondern eine bedeutende Masse hat, kann sich dieser, bei auftretenden Laständerungen aus dem Netz, nicht trägheitslos, die neue Polwinkelposition einnehmen, sondern dieser pendelt zunächst in Form einer gedämpften Torsionsschwingung um die neue Polwinkelposition.

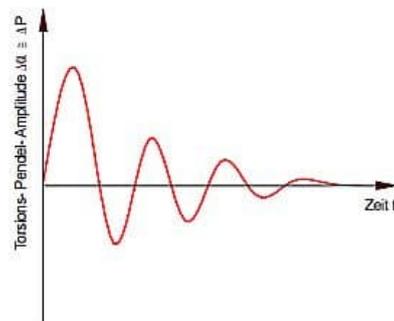
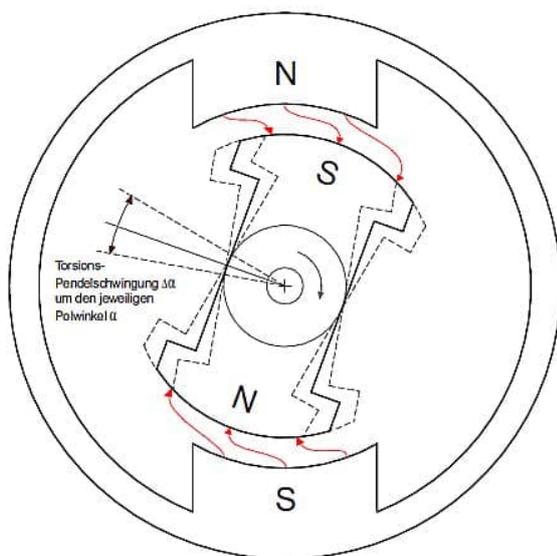
Polwinkelpendelungen sind also Wirklastschwingungen oder entstehen aus diesen, so dass sich diese Schwingungen nicht nur auf den Turbosatz beschränken und unter ungünstigen Voraussetzungen den gesamten gespeisten Netzabschnitt mit Wirkleistungsschwingungen beaufschlagen können, was unter Umständen zum Totalausfall eines Netzabschnitts führen kann.

Die Firma Siemens empfiehlt beispielsweise, dass Turbosätze ab 100 MVA ein aktives und wirksames **Pendel- Dämpfungs- System (PDG)** haben sollten.

Im nachfolgenden linken Bild sind nochmals die vorstehend beschriebenen Pendelbewegungen eines Generatorläufers bei vorhandenen Pendelschwingungen dargestellt.

Das rechte Bild zeigt, die mit einem Transienten- Rekorder geschriebene Wirkleistung  $\Delta P$  während eines, aus dem Landesnetz aufgeprägten Lastwechsels.

Die auftretenden Pendelfrequenzen richten sich je nach der Größe des Turbosatzes bzw. dem angeschlossenen Netzabschnitt und liegen zwischen 0,8 Hz und 2,0 Hz.



Was kann man also tun, um diese Pendelbewegungen zu dämpfen oder gar zu verhindern?

Eines vorweg, verhindern kann man diese Pendelschwingungen des Wellenstrangs nicht, man kann sie nur mehr oder weniger dämpfen.

Wenn man diese über der Zeit darstellt, sollten bei einem optimierten Pendeldämpfungssystem nur noch eine oder anderthalb halbwellen als Pendelbewegung sichtbar sein.

Theoretisch, aber praktisch nicht umsetzbar, wäre eine „Backenbremse“ an der Generatorwelle, die im Gegenkopplungsbetrieb, zu den Pendelbewegungen, die Welle entsprechend bremst oder loslässt, um dadurch eine Kraftereinwirkung auf die Welle auszuüben.

In der realen technischen Welt kann man auch durch phasengerechte Modulation des Erregerstroms die magnetische Rückholkraft des Läufers steuern.

Diese phasengerechte Modulation des Erregerstroms wird durch das im Software- Algorithmus des Erregersystems integrierten Pendeldämpfungsgerätes (PDG) gesteuert.

Die „Kunst“ dabei besteht darin, die ca. 15 Parameter des PDG so zu verändern, dass sich eine dämpfende Wirkung ergibt. Das geht nicht mehr mit einem Taschenrechner, sondern erfordert ein so genanntes „Mathematisches Modell“ welches in einem aufwendigen Rechenvorgang Änderungsvorschläge für die Vielzahl der Parameter ausgibt.

In der Praxis sind dazu mehrere Korrektur- Rechnungen erforderlich, bis sich ein akzeptabler Dämpfungserfolg einstellt.

In der im Anhang angegebenen Informationsquelle [3] ist die PDG oder auch PSS- Problematik noch ausführlicher beschrieben.

## 6. Verfahren zur Zustandsbeurteilung von Wicklungsbaugruppen an Hochspannungsmaschinen

Der größte Wunsch eines Betreibers von Hochspannungs- Maschinen bestand schon immer darin, während durchgeführter Messungen bei Revisionen oder Neuwicklungen eine Aussage darüber zu erhalten, wie groß die zu erwartende Restlebensdauer der Wicklungsbaugruppen sein wird.

Leider gibt es dazu kein Messverfahren, aus der mit einer Messung eine diesbezügliche Information verlässlich abgeleitet werden kann.

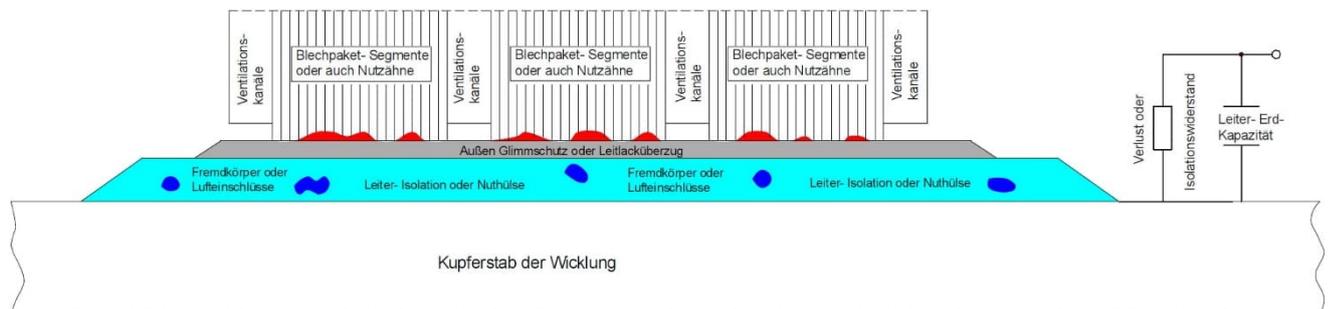
Alle bekannten Messverfahren, sei es nun die Messung des Isolationswiderstandes, der Verlustfaktormessung ( $\tan\delta$ ) oder der Teilentladungsmessung (TE), liefern zwar einen aktuellen Zustandswert, der den momentanen Istzustand beschreibt, geben aber keine Aussage über einen Entwicklungstrend von der Neuwicklung bis zum Datum der durchgeführten Messung bzw. wann ein möglicher Wicklungsschaden zu erwarten wäre..

Die Zustandsaussagen der vorstehend genannten Verfahren können daher nur aus dem Entwicklungstrend zyklisch durchgeführter Messungen abgeleitet werden.

Dabei ist es wichtig, ob eingetretene Veränderungen plötzlich aufgetreten oder gleichmäßige Veränderungen in der zeitlichen Tiefe eingetreten sind.

### 6.1. Aufbau des Isolationssystems einer Hochspannungswicklung

Doch betrachten wir uns zunächst den Aufbau eines Isolationssystem von Hochspannungswicklungen.



Die radiale Struktur eines Nutaufbaus zwischen dem Kupferleiter der Wicklung und der Nutwand des Blechkpaketes von Hochspannungsmaschinen kann auf Grund der Vielschichtigkeit sehr komplex sein.

Zum einen ist da die Parallelität der Nutwände zu nennen. Bei der Aufeinander- Schichtung tausender Einzelbleche ist es unausweichlich, dass sich dabei Differenzen in der Nutbreite über die Länge des gesamten Blechkpaketes ergeben, im obigen Bild mit den rot gekennzeichneten Stellen markiert.

Damit diese Hohlräume, die eigentlich Lufteinschlüsse sind, elektrostatisch nicht zu Glimmerscheinungen führen können, sind die Außenseiten der Wicklungsstäbe mit einem Halbleitenden Überzug, dem so genannten Glimmschutz oder Leitlack, überzogen.

Dieser Überzug soll elektrische Felder im Bereich der rot markierten Stellen potentialtechnisch kurzschließen.

Das funktioniert auch relativ gut, solange die Wicklung neu ist. Im weiteren Verlauf der Betriebszeit kommt es aber zu mehr oder weniger großen Relativbewegungen zwischen den Wicklungsstäben und dem Blechkpaket, so dass dieser Glimmschutz partiell durch Reibung zerstört werden kann.

In diesem Fall ist an diesen Stellen keine Potentialableitung mehr möglich, so dass Glimmerscheinungen entstehen können. In Verbindung mit der dadurch einhergehenden Elektroerosion kommt es zur Abtragung mikroskopisch kleiner, pulverisierter Isolationsteile, welche in zeitlicher Tiefe die Isolationsstärke so weit schwächen, bis ein Wicklungsdurchschlag eintritt. Daher wird an jedem gefertigten Wicklungselement der Widerstands- Wert des aufgetragenen Glimmschutz- Überzuges mit einer so genannten Schneiden- Elektrode, bei der sich lamellierte Schneiden mit einer Länge von 100 mm, im Abstand von 10 mm gegenüberstehen, gemessen. Der dabei gemessene Widerstand sollten zwischen 1 bis 2 k $\Omega$  liegen, wobei Werte  $\leq$  10 k $\Omega$  Auch noch akzeptabel sind.

Auch in der, durch Bandagier- Technik aufgetragenen Isolationshülse können während der Fertigung Lufteinschlüsse oder kleinste Fremdkörper versehentlich mit eingearbeitet werden. Unabhängig davon, ob diese Fremdkörper metallisch oder

nichtmetallischen Ursprungs sind, beeinträchtigen diese die homogene Ausbreitung des elektrischen Feldes in der Isolationshülse, so dass es auch in diesem Fall, wegen der Feldverzerrung zu partiellen Überspannungen kommen kann.

Die große Frage ist nun, kann man durch die unterschiedlichen Prüfverfahren die vorstehend aufgeführten Fehler bzw. Zustandsverschlechterungen erkennen?

Die Antwort lautet, ja teilweise aber nur bedingt mit einem sehr großen Schatz an Erfahrungen.

Es gibt kein Prüfverfahren, welches definitive Endergebnisse liefert, sondern immer nur Mittelwerte über die Summe aller Wicklungsteile.

Eine mögliche zukunftsweisende Diagnose kann nur aus der Trend- Entwicklung, der Messergebnisse in einer zeitlichen Tiefe gewonnen werden.

Nachfolgend möchte ich auf einfache Weise die physikalischen Hintergründe der drei Messverfahren beschreiben.

## 6.2. Messung des Isolationswiderstand

Der Isolationswiderstand ist eine wichtige Kenngröße, der Aufschluss über den Zustand der Wicklungsisolierung von Ständer- und Läuferwicklungen gibt. Er wird durch reversible Vorgänge wie Feuchtigkeitsaufnahme im Inneren von älteren Isolierungen, Befeuchtung oder leitfähige Verschmutzung der Oberflächen der Epoxidharz-Glimmer-Isolierungen bestimmt. In seltenen Fällen kommt es aber auch zu irreversiblen Veränderungen des Isolierungsmaterials, wie zum Beispiel zu Rissen in der Isolierung oder auch zu chemischen Umwandlungen, die den Isolationswiderstand negativ beeinflussen.

Der Isolationswiderstand einer Wicklung setzt sich aus Parallel- und Serienschaltungen von Durchgangs- und Oberflächenwiderständen zusammen und wird von verschiedenen Faktoren wie Feuchtigkeit und Verschmutzung, durch die Maschinen-Größe und von der Wicklungstemperatur beeinflusst.

Bei erhöhtem Feuchtigkeitsgehalt der Isolierung nimmt die Ionenleitung in starkem Maße zu. Durch leitfähige Verschmutzung entstehen erhöhte Oberflächenströme. Insbesondere bei kunstharzgebundenen Wicklungsisolierungen wird der Isolationswiderstand maßgeblich durch den Oberflächenwiderstand bestimmt, da das Kunstharz praktisch keine Feuchtigkeit aufnimmt.

Die Messung des Isolationswiderstandes kann prinzipiell entweder durch eine direkte Messung mit einem handelsüblichen Isolationswiderstandsmessgerät oder durch eine indirekte Messung mit einer DC-Spannungsquelle und einem geeigneten Strommesser (Mikro-Amperemeter) erfolgen.

Weitergehende Messungen des Isolationsstromes sowie die Bestimmung des Polarisationsindex im Rahmen von Diagnose-Messungen als Teil einer Funktionsprüfung des Isoliersystems geben zusätzliche Informationen über den Zustand der Isolierung.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Resultate der Messungen nicht zwangsläufig auf mögliche örtliche Schwachstellen der Isolierung hinweisen.

Unabhängig davon, welches Messverfahren dabei zur Anwendung kommt, sollten an Hochspannungsmaschinen die Messwerte immer mit einer Mess- Spannung von 5 kV und über eine Zeit von 1 Minute und 10 Minuten aufgenommen werden.

Daraus können dann folgende Kenngrößen berechnet werden:

$$\begin{array}{ll} \text{Polarisationsindex oder Nachladezahl:} & \text{PI} = N = I_1 / I_{10} = R_{10} / R_1 \\ \text{Isolationszeitkonstante:} & \tau = R_{10} \times C \quad (C = \text{Leiter- Erdkapazität}) \end{array}$$

Als Richtwerte gelten dabei  $\text{PI} \geq 2,0$  für Kunstharzwicklungen und  $\text{PI} \geq 1,5$  für Schellack- Asphalt- Wicklungen.

Werden an den Wicklungsteilen kleiner Polarisations- Indizes gemessen, ist dies ein Hinweis dafür, dass möglicherweise Oberflächenfeuchtigkeit oder bei Schellack- bzw. Asphalt- Isolationen Feuchtigkeit zwischen den lagenweise aufgetragenen Isolationsmaterial befindet.

Die Messungen an Ständerwicklungen von Motoren oder Generatoren sind dabei an den einzelnen Wicklungsphasen durchzuführen, wobei die jeweils nicht gemessenen Phasen geerdet sein müssen.

Dabei werden die Oberflächen- und Diffusionsströme im Nutteil und im Wickelkopfteil einer jeder Wicklungsphase berücksichtigt.

Als vierte Messung werden die drei Phasen der Ständerwicklung miteinander verbunden und gemeinsam gegen das Ständergehäuse gemessen.

Mit dieser Messung werden nur die Oberflächen- und Diffusionsströme im Nutteil erfasst.

*Texte teilweise aus der Literaturangabe [6] entnommen*

### 6.3. Verlustfaktor- oder $\tan\delta$ - Messung

Der dielektrische Verlustfaktor  $\tan\delta$  ist ein Maß für die dielektrischen Verluste in der Wicklungsisolierung. Durch Messung dieses dielektrischen Verlustfaktors kann die Qualität von neuen, aber auch gealterten Wicklungsisolierungen drehender elektrischer Maschinen bewertet werden.

Insbesondere kann die Einhaltung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität und das dielektrische Verhalten des gesamten Isoliersystems der Wicklung überwacht werden.

Beispielsweise liefert der Verlustfaktor, der an gealterten Ständerwicklungen gemessen wird, wichtige Informationen über den aktuellen Zustand des Isoliersystems und mögliche Schädigungen.

Verlustfaktormessungen liefern allerdings keine Anhaltspunkte über die Verteilung der dielektrischen Verluste innerhalb der gesamten Isolierung und somit ist es, im Gegensatz zur Teilentladungsmessung, nicht möglich, örtliche Schwachstellen im Isoliersystem direkt zu lokalisieren.

Mit dem dielektrischen Verlustfaktor  $\tan\delta$  wird das Verhältnis von Wirkleistung und Blindleistung bei Hochspannungsprüfungen nach der Beziehung  $\tan\delta = P / Q$  gemessen.

Wie auch bei der Messung des Isolationswiderstandes kann der  $\tan\delta$  ebenfalls auf zwei verschiedene Verfahren gemessen werden.

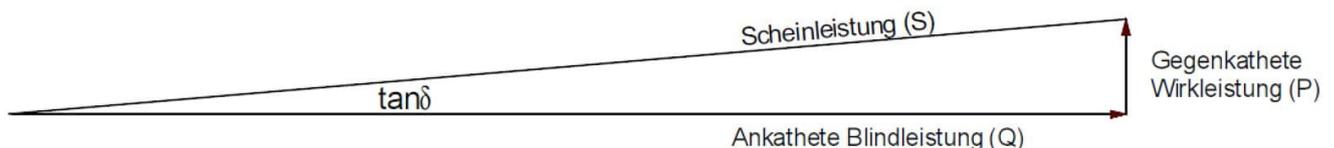
Zum einen kann man den Verlustfaktor mit einer so genannten Schering- Messbrücke in Verbindung mit einem Schutzgas gefüllten Normal- Kondensator, der einen besonders kleinen eigenen Verlustfaktor aufweisen muss, bestimmen, oder man misst während der  $\tan\delta$ - Messung die physikalischen Größen P und S, mit dafür geeigneten Messgeräten, direkt im Messkreis.

Das zweite Verfahren wurde überwiegend in der damaligen DDR bei Vorortmessungen angewendet, weil es ohne den voluminösen und empfindlichen, mit Schutzgas gefüllten Normalkondensator auskam. Die erforderlichen drei Messinstrumente waren wesentlich leichter und gefahrloser zu transportieren als der Normalkondensator, der als Gefahrguttransport eingestuft wurde.

Bezüglich der Messgenauigkeit konnte man zwischen einer Messung mit Schering- Brücke und dem P / S- Verfahren kaum nennenswerte Differenzen feststellen.

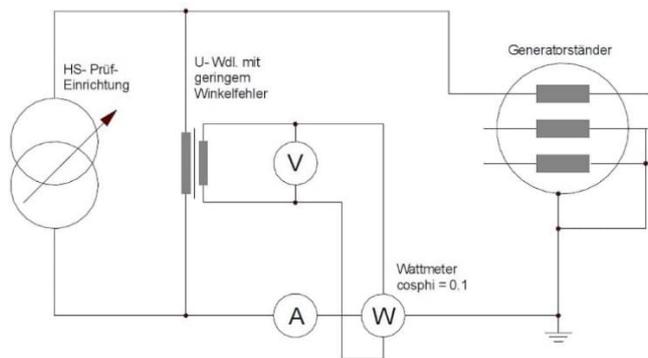
Nachfolgend die Erklärung des Messprinzips:

Legt man an die Wicklungsphasen einer Hochspannungsmaschine eine Mess- Spannung an, so fließt in das Messobjekt eine so genannter Scheinleistung, die folgende vektorielle Komponenten beinhaltet.



Weiterhin zeigt die vorstehende Skizze, die bei weitem nicht die realen Längenverhältnisse wiedergibt, dass hinsichtlich der Betragslängen zwischen S und Q kaum feststellbare Differenzen ergaben, so dass im weiteren Verlauf  $Q = S$  angenommen werden konnte und der  $\tan\delta$  praktischerweise aus der Beziehung  $\tan\delta = P/S$  berechnet wurde.

Die nachfolgende Skizze zeigt nun den vielfach vor Ort praktizierten Messaufbau:

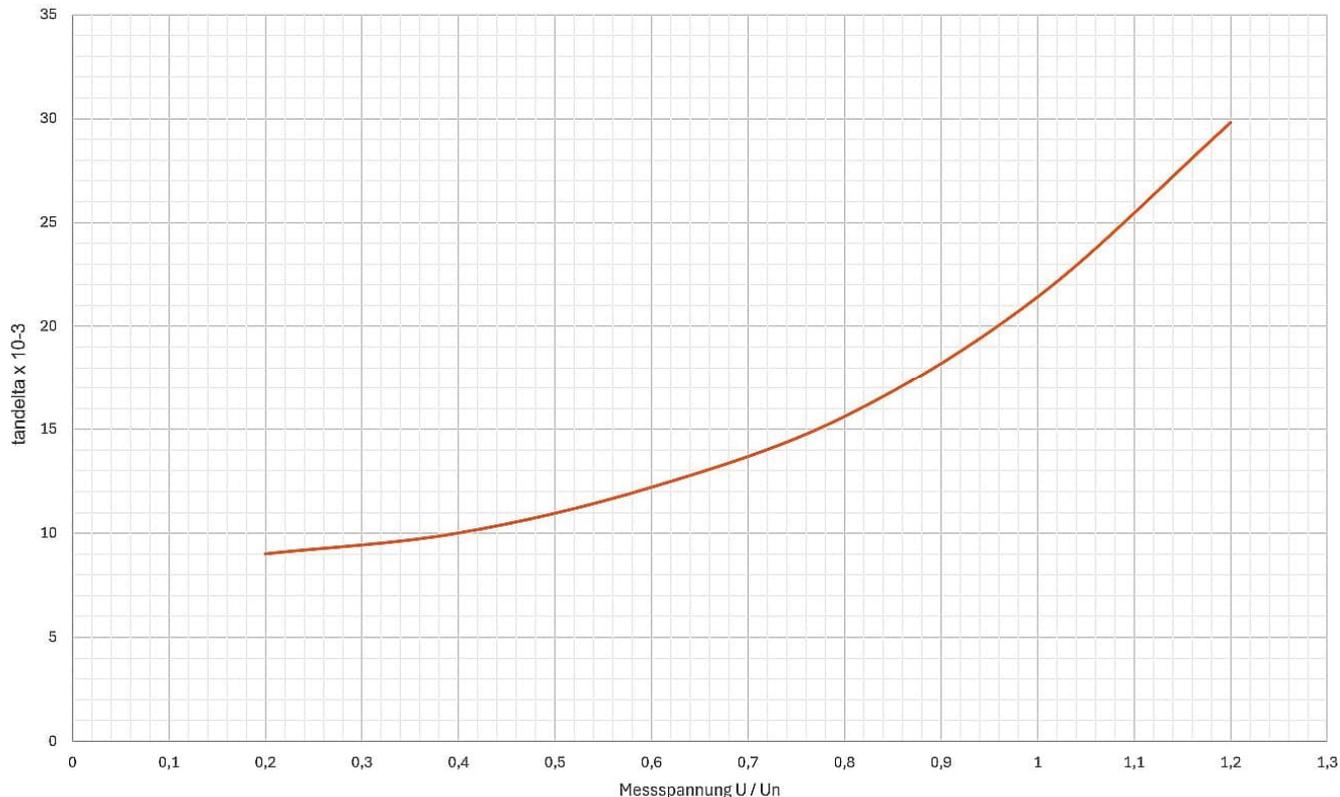


Mit dem nebenstehend dargestellten Strom- und Spannungsmesser konnte aus dem Produkt  $U \times I$  die in das Messobjekt hineinfließende Scheinleistung  $S$  berechnet werden.

Die Wirkleistung, in diesem Fall die Summe aller dielektrischen Verluste, wurde von dem Wattmeter angezeigt. Um den nutzbaren Zeigerausschlag zu vergrößern, wurde kein normales Wattmeter mit der Skalierung  $\cos\phi = 1.0$ , sondern ein spezielles Instrument mit  $\cos\phi = 0.1$  eingesetzt. Derartige Geräte hatten auch bei geringen Mess-Spannungen bzw. Verlustleistungen noch hinreichend große und gut ablesbare Zeigerausschläge.

Die Messung des Verlustfaktors erfolgte in Spannungsstufen von  $0,2 \times U_N$  bis zu einem Maximalwert von  $1,2 \times U_N$ . Die nachfolgende Grafik zeigt einen typischen Werteverlauf einer Verlustfaktormessung an einer Wicklungsbaugruppe.

Typischer Verlauf einer aufgenommenen Tandelta Messung



### 6.3.1. Interpretation der Messwerte

Der Vergleich von Messungen über die Zeit bzw. der Vergleich der einzelnen Phasen einer Messung haben sich als das geeignetste Mittel herausgestellt, um eine verlässliche Aussage zu den Verlustfaktorwerten tätigen zu können. Dazu ist es ratsam die Verlustfaktormessung in bestimmten Zeitabständen zu wiederholen. Einen Grenzwert gibt es bei der Messung von gesamten Wicklungen oder Wicklungssträngen nicht. Die Interpretation der Messung wird an folgenden Parametern festgemacht:

- $\tan(\delta)$  bei der geringsten Spannung: Dieser Wert wird herangezogen, um den Verlustfaktor mit relativ geringem Einfluss von Oberflächenströmen im Wickelkopf zu erhalten.
- $\Delta \tan(\delta)$ : Wie verhält sich der Verlustfaktor über die einzelnen Spannungsstufen?
- $\tan(\delta)$  bei Nennspannung bzw. Phase/Erde Spannung: Wie hoch steigt der Verlustfaktor bei dieser Spannungsstufe?
- Haben sich die zuvor genannten Werte seit der letzten Messung verändert? Ist diese Änderung in allen drei Phasen ähnlich?
- Sind die einzelnen Phasen zueinander unterschiedlich: Durch das Auftrennen der einzelnen Phasen erhält man die dreifache Anzahl der Prüflinge. Einzelne Schwachstellen treten nicht gleich verteilt in allen drei Phasen auf, wodurch Anomalitäten erkannt werden können.
- Gibt es einen „Ionisationsknick“: Ein Knick in der Kurve der Verlustfaktorergebnisse wird oft als ein Zeichen für das Einsetzen von Teilentladungen interpretiert. Dieser ersetzt jedoch nicht die Teilentladungsmessung.
- Um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Messungen garantieren zu können, ist es ratsam, die Messungen dann durchzuführen, wenn die Umgebungsbedingungen gleich bzw. ähnlich wie bei den vorangegangenen Messungen sind.

*Texte teilweise aus der Literaturangabe [6] entnommen*

#### 6.4. Teilentladungsmessung (TE)

Die Messung von elektrischen Teilentladungen (TE) an Ständerwicklungen von Generatoren und Motoren ist ein seit vielen Jahren erfolgreich praktiziertes Verfahren zur Zustandsbewertung des Isoliersystems. Mit der TE-Messung kann sowohl die Qualität neu gefertigter Wicklungen und Wicklungselemente überwacht werden als auch der Zustand betrieblich gealterter Wicklungen bei Maschinenrevisionen vor Ort beurteilt werden. Während andere dielektrische Untersuchungsmethoden wie die Isolationsstrommessung oder die Verlustfaktormessung nur integrale Informationen über die Eigenschaften der gesamten Isolierung liefern, kann die TE- Messung aufgrund ihres differenzierenden Charakters lokal begrenzte Schwachstellen im Isoliersystem erkennen.

Teilentladungen (TE) sind Entladungen innerhalb oder an der Oberfläche eines Isoliermediums, welche – wie der Name schon sagt – die Isolierung teilweise überbrücken. Dabei treten Teilentladungen an jenen Stellen auf, an welchen die lokale Feldstärke die dortige Durchschlagsfestigkeit übersteigt. Dies kann vielerlei Ursachen haben wie z.B. Hohlräume oder Fremdkörper (unterschiedliche Permittivität  $\epsilon$ ), an Spitzen oder Kanten, zu geringe Abstände an den Phasentrennstellen oder erodierte bzw. nicht vorhandene elektrische Potential- Absteuerungen.

Der große Vorteil der Teilentladungsmessung ist dabei ihre Selektivität. Im Unterschied zu den meisten anderen Bewertungsmethoden, können einzelne Fehlstellen identifiziert und auf Grund ihrer Form im phasenaufgelösten Muster bestimmten Fehlerbildern zugeordnet werden.

Teilentladungen können elektrisch, akustisch, optisch oder deren Beiprodukte über eine Gasmessung ermittelt werden. Die beiden letzteren Methoden funktionieren vor allem bei äußeren Entladungen. Da sich die elektrische TE-Messung mittels Koppel-Kondensator und Ankoppelvierpol bei der rotierenden Maschine durchgesetzt hat, beschränkt sich diese Information auf diese Methode.

Jede Teilentladung erzeugt einen schnellen, unipolaren Stromimpuls, welcher sich vom Entstehungsort in beide Richtungen ausbreitet. Dabei können die Entladungen nicht direkt an ihrer Entstehung gemessen werden, sondern an den zugänglichen Punkten der Wicklung.

Meist sind dies Ausleitung und Sternpunkt. Da es sich nicht um die Ladung direkt an der Entstehungsstelle handelt, spricht man von einer „scheinbaren Ladung“ die in Coulomb (C) bzw. in pC oder nC gemessen wird. Bei erfolgter Normierung (Kalibrierung) vor der TE-Messung ist diese ein guter Indikator für den Energiegehalt der Ladung am Entstehungsort.

Die Messung von Teilentladungen (TE) wird seit vielen Jahren als aussagefähige Methode zur Zustandsbeurteilung des Isolationssystems elektrischer Maschinen eingesetzt. Dies umfasst die Beurteilung der Qualität von neu gefertigten Wicklungen und Wicklungselementen sowie die Zustandsbeurteilung betriebsgealterter Wicklungen im Rahmen von Vor-Ort Untersuchungen. Im Gegensatz zu anderen dielektrischen Untersuchungsmethoden, wie z. B. der integralen Messung des Verlustfaktors  $\tan\delta$ , können mit der TE-Messung lokal begrenzte Fehlstellen im Isolationssystem der Maschine erfasst und bewertet werden.

Die TE-Messung an älteren Maschinen im Kraftwerk dient als Offline- Messung in erster Linie dem Erkennen lokaler Schwachstellen, der Einschätzung des Alterungszustandes und der Verfolgung des Lebensdauerverbrauchs durch Beobachtung der Trendentwicklung über einen längeren Zeitraum.

*Texte teilweise aus der Literaturangabe [6] entnommen*

## 7. Quellenverzeichnis

Außer meinem eigenen Fachwissen wurden zusätzliche Informationsquellenbenutzt:

- [1] **LINK:**  
<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/kraft-auf-stromleiter-e-motor/grundwissen/kraft-auf-stromfuehrende-leiter-im-magnetfeld>
  
- [2] **LINK: „Die Querfeldspule.PDF“**  
<https://www.ingenieurbuero-john.eu/wissensspeicher> [ THEMENSCHRIFT 4 ]
  
- [3] **LINK: „PSS.PDF“**  
<https://www.ingenieurbuero-john.eu/wissensspeicher> [ THEMENSCHRIFT 1 ]
  
- [4] **LINK „Von der Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie bis zum Leistungsdiagramm.PDF“**  
<https://www.ingenieurbuero-john.eu/wissensspeicher> [ THEMENSCHRIFT 12 ]
  
- [5] **LINK: „Das Kompakterregersystem DIGUREG-2.PDF“**  
<https://www.ingenieurbuero-john.eu/wissensspeicher> [ THEMENSCHRIFT 8 ]
  
- [6] **LINK:**  
[https://www.ove.at/fileadmin/userdaten/docs/energietechnik/Leitfaden\\_Isolationsmessverfahren\\_V1\\_1\\_2024.pdf](https://www.ove.at/fileadmin/userdaten/docs/energietechnik/Leitfaden_Isolationsmessverfahren_V1_1_2024.pdf)