



Thema: Wellenspannungen und Wellenströme, Entstehungsursachen und Wirkungen
Subject:

Datum: 25.02.2016
Date:

1. Allgemeines

In der Elektrotechnik besteht zwischen dem Auftreten einer Spannung, des von dieser getriebenen Stromes sowie den dabei auftretenden magnetischen und elektrostatischen Feldern, eine physikalisch bedingte und untrennbare Wechselbeziehung. Sobald die äußeren Bedingungen es erlauben treten diese vier physikalischen Größen immer gemeinsam auf, auch wenn im Einzelfall die eine oder andere Komponente nicht sofort erkennbar ist.

Als Beispiele seien an dieser Stelle die elektrischen Vorgänge in einem aus Induktivität und Kapazität bestehenden Resonanzkreis genannt. Während des Schwingungsvorganges wechselt die darin befindliche Energie mit der Resonanzfrequenz ständig zwischen einer elektrostatischen und einer magnetischen Speicherform.

Auch die elektrische Maschine, in welcher Form auch immer, funktioniert nur durch die Wechselbeziehung bzw. dem Zusammenwirken von magnetischen und elektrischen Feldern. Die Erzeugung von Elektroenergie im großen Umfang, die uns die bekannten Annehmlichkeiten des Lebens beschert, wäre ohne dieses physikalische Grundprinzip nicht denkbar.

Natürlich oder auch leider hat dieses Grundprinzip auch physikalisch bedingte parasitäre Nebeneffekte, die ebenfalls vorhanden sind und nicht eliminiert werden können. Die „Ingenieurskunst“ besteht nun darin, mit diesen Nebeneffekten richtig umzugehen und dafür zu sorgen, dass diese den gewollten Hauptprozess nicht nachteilig oder störend beeinflussen können.

Einer dieser parasitären Nebeneffekte ist die Ausbildung von Wellenspannungen an elektrischen Maschinen, insbesondere an Synchronmaschinen. Diese Wellenspannungen sind systembedingt und beeinflussen die Funktion der elektrischen Maschine zunächst nicht, sofern durch konstruktive Maßnahmen dafür gesorgt wird, dass diese Wellenspannungen keinen Strom treiben können.

Kommt dieser Strom beispielsweise durch Überbrückung der konstruktiv vorgesehen Isolationsstellen durch Montagefehler oder starker Verschmutzung doch zum Fließen, treten an den kleinen Kontaktpunkten innerhalb der Lager oder der Verzahnung eines Getriebes hohe Stromdichten auf, die ein lokales Aufschmelzen der Metalloberfläche in Form kleiner Krater bewirken. Diese Krater erhöhen die Reibung im Lager und leiten damit durch höhere Erwärmung, verbunden mit schlechterer Schmierung, den Ausfall des Lagers ein.

Prinzipiell kann die Entstehung von Wellenspannungen vier unterschiedlichen Ursachen zugeordnet werden.

a) Asymmetrien im magnetischen Kreis

- nicht symmetrischer Luftspalt durch exzentrischer Ausrichtung des Läufers
- Anisotropie der magnetischen Eigenschaften des verwendeten Dynamoblech- Materials
- Teilfugen bei geteilten Ständerblechpaketen größerer Wassergeneratoren
- Verformung der Ständerbohrung durch Radialkräfte im Luftspalt
- Windungsschlüsse in der Läuferwicklung

b) Magnetisierte Läufer- Wellen

- Windungsschlüsse in der Läuferwicklung
- Unachtsamkeit des Montagepersonals während der Schweißarbeiten in der Nähe außerhalb des Generators abgelegter Läufer

c) Kapazitive Aufladungen

- Statische Aufladungen durch Dampfströmungen an den Turbinen- Schaufeln, insbesondere der Niederdruckstufen

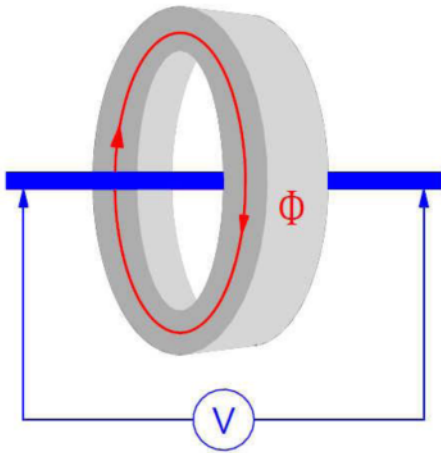
d) Kapazitive Einkopplungen

- bei Verwendung statischer Erregereinrichtungen oder nicht sinusförmiger Umrichter zur Speisung von Antriebsmaschinen

2. Entstehung von Wellenspannungen

Nachfolgend möchte ich nun versuchen, dem interessierten Kraftwerkspersonal, die Entstehung der Wellenspannungen unter den vorstehend aufgeführten Einflussfaktoren in unkomplizierter Weise zu erklären.

Zur Einflussgröße a).



Zunächst gehen wir von einer vereinfachten Darstellungsweise aus. Das nebenstehende Bild zeigt ein ringförmiges Blechpaket mit einer eingezeichneten Ringdurchflutung Φ bestimmter Frequenz. In der Bohrung des ringförmigen Blechpaketes befindet sich ein gestreckter Leiter, im Bild blau dargestellt.

Das Bild erinnert zunächst an die funktionelle Darstellung eines Durchsteck- Stromwandlers und genauso verhält sich die dargestellte Struktur.

Erinnern wir uns an die unter Pos.1. beschriebene untrennbare Wechselbeziehung eines Magnetfeldes und dem fließenden elektrischen Strom.

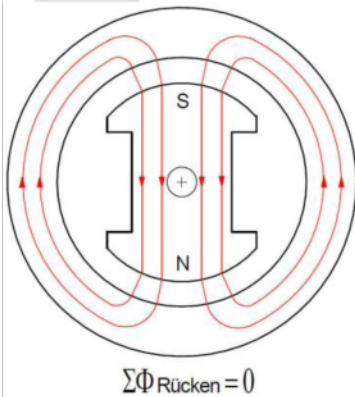
Der magnetische Wechselfluss im ringförmigen Blechpaket wird an den Enden des hindurchgeführten Leiters eine elektrische Spannung induzieren, die mit dem dargestellten Voltmeter messbar ist.

und erregerseitigen Wellenende messbar sein. Damit ist bereits die Wirkung der unter a) aufgeführten Einflussgrößen zur Entstehung von Wellenspannungen beschrieben.

Im Umkehrschluss bedeutet das aber, wenn idealerweise die Summe aller in einem Generatorblechpaket vorhandenen magnetischen Flüsse $\Phi = 0$ wäre und sich keine Ringflusskomponente ausbilden kann, würde in der Welle eines Läufers zunächst keine Wellenspannung induziert.

Wenn man nun den gestreckten Leiter durch einen Generatorläufer ersetzt, würde die Spannung als Wellenspannung am antriebsseitigen

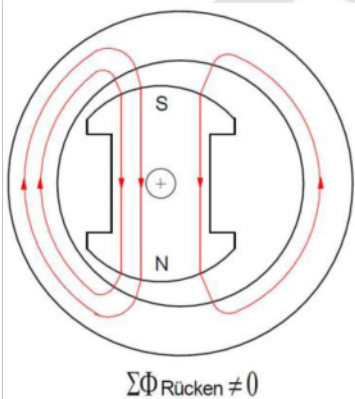
Wie sieht denn nun die Verteilung des Magnetflusses in einem Ständerblechpaket ohne Teilfuge, bei idealer zentrischer Läuferausrichtung aus?



Im nebenstehenden Bild ist dieser Zustand dargestellt.

Darin sind zwei absolut gleiche Teilflüsse zu sehen, die von den Magnetpolen des Läufers ausgehen und sich über das ringförmige Blechpaket schließen.

Da die Flussrichtungen gegenläufig und die Flussdichten gleich sind subtrahieren sich die magnetischen Größen voneinander zu null und somit verbleibt kein Restanteil, der eine Wellenspannung induzieren könnte.

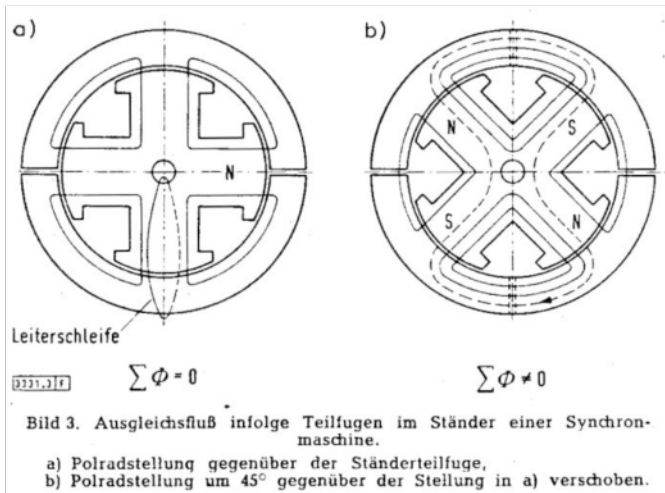


Das nebenstehende Bild zeigt einen exzentrisch in der Ständerbohrung befindlichen Läufer, natürlich in übertriebener Darstellung.

Hier sind die Teilflüsse nicht mehr symmetrisch verteilt, so dass die Differenz nicht mehr null ergibt.

Somit bleibt ein asymmetrischer Restanteil übrig, der im Läufer in Längsrichtung eine Wellenspannung induziert.

Noch extremer stellt sich die Situation bei Generatorständen dar, die wegen ihrer großen Durchmesser geteilt ausgeführt sind.



Das nebenstehende Bild aus ETZ-A Bd. 85 (1964) H.4 zeigt die skizzierte Darstellung einer 4 poligen Synchronmaschine mit geteilten Ständerblechpaket.

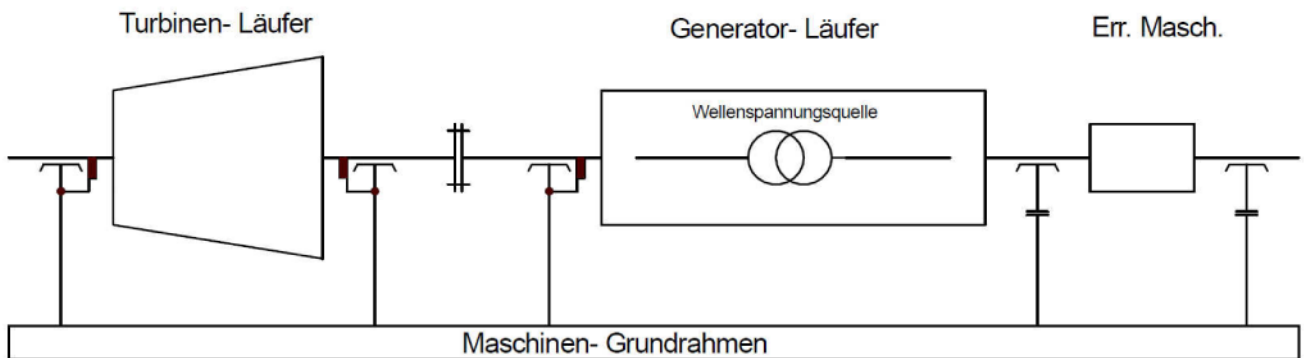
Darin ist deutlich erkennbar, wie sich bei bestimmten Polradstellungen zur Lage der Blechpaketteilfugen magnetische Asymmetrie und damit Wellenspannungen entstehen können. Allerdings kann man bei geteilten Ständern durch konstruktive Maßnahmen die Entstehungsursache der Wellenspannungen verringern.

Es wird immer eine Wellenspannung auftreten, wenn die Teilfugen-Anzahl t , geteilt durch die Polpaarzahl p , den kleinsten gemeinsamen Teiler haben und sich im Zähler eine ungerade Zahl ergibt. Für das nebenstehende Beispiel ergibt sich ein $t/p = 2/2 = 1/1 =$ ungerader Zähler und damit das Auftreten von Wellenspannungen.

Die zusätzlich zur Entstehungsursache a) angegebenen Unterpositionen bewirken im Wesentlichen den gleichen Effekt, nämlich eine Verzerrung der magnetischen Symmetrie im Blechpaketrückes und damit die Entstehung von Wellenspannungen. Weiterhin ist zu erwähnen, dass der Energiegehalt der durch magnetische Asymmetrie im Läufer induzierten Wellenspannungen sehr groß ist. Das bedeutet, dass bei kurzgeschlossener Wellenspannung durch eine beschädigte Isolierung einen sehr hohen Wellenstrom über die Schadstelle fließen und durchaus dreistellige Ampere-Beträge erreichen kann.

Wie kann verhindert werden, dass die systembedingten Wellenspannungen einen Wellenstrom treiben können?

Die einzige Möglichkeit besteht darin, dass erregerseitige Wellenende, einschließlich der daran befestigten Erregermaschine, gegenüber dem Maschinengrundrahmen isoliert aufzubauen. Die nachfolgende Skizze zeigt im Wesentlichen das Prinzip.



Wie wir nun aus den vorstehenden Ausführungen wissen, befindet sich die Wellenspannungsquelle symbolisch im Inneren des Generatorläufers und die Spannung liegt am antriebs- und erregerseitigen Wellenende an.

Oberster Grundsatz ist nun dafür zu sorgen, dass die Wellenspannung über die beiden Lager-Böcke und dem Maschinen-Grundrahmen keinen Lagerstrom treiben kann. Um das zu garantieren, müssen ab dem erregerseitigen Lager alle weiteren, noch folgenden Lagerstellen gegenüber dem Grundrahmen isoliert aufgebaut werden.

Das antriebsseitige Wellenende sowie alle weiteren Wellen wie Getriebe und Turbine müssen mit geeigneten Erdungsbürsten leitend mit dem Grundrahmenpotential verbunden werden.

Aus diesem Grund muss ich aus meiner Erfahrung heraus dringen empfehlen, dass die Lagerstromfreiheit bei jeder Wiederinbetriebnahme nach De- und Montagearbeiten im Lagerbereich oder nach einer Revisions- Vollmontage auf den Zustand einer wirksamen Lagerisolation zu prüfen bzw. nachzuweisen ist.

Bereits 1978 habe ich für meinen damaligen Arbeitgeber eine optimierte Abfolge von Messungen entwickelt, wie man die Lagerstrom- Freiheit eines Maschinensatzes zweifelsfrei nachweisen kann.

Falls ein Interesse Ihrerseits daran besteht, kontaktieren Sie mich bitte.

Obwohl die Entstehungsursache der Wellenspannung durch magnetische Asymmetrien wegen ihres Energiegehaltes am gefährlichsten einzustufen ist, möchte ich nachfolgend noch auf eventuelle Probleme eingehen, die durch eine magnetische Welle verursacht werden können.

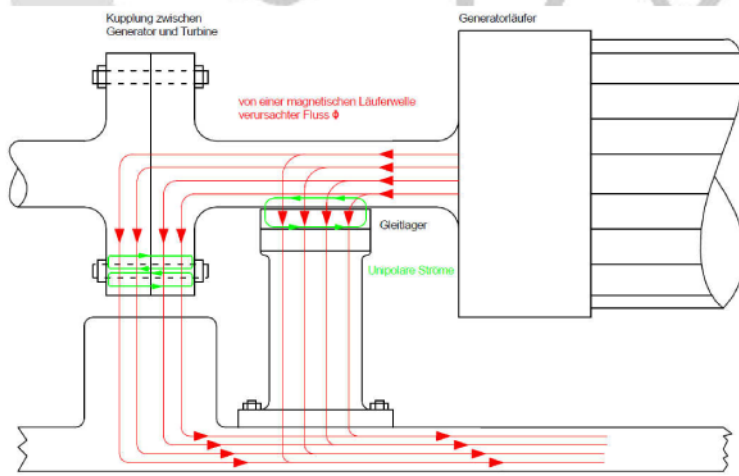
Zur Einflussgröße b).

Das Magnetisieren von Läuferwellen im Generatorbetrieb tritt eigentlich sehr selten auf und kann im Betrieb der Maschine durch starke Schiefasten oder auch durch einen Betrieb mit einem deutlich windungsschlussbehafteten Läufer entstehen. Während meiner Service- Tätigkeit kann ich mich nur an einen Fall im Jahr 1976 erinnern, bei welchem in einem Bahnstromwerk nördlich von Halle gelegen, die Kupplungshälfte des Bahngenerators während der Demontagearbeiten anlässlich einer Revision, nicht mehr von der des angesetzten Getriebes lösbar war. Beide Kupplungshälften waren in einer Art Hochstrom- Kaltschweißverfahren miteinander verbunden. Als Ursache wurde im weiteren Verlauf ermittelt, dass die aus der Kupplungs- Stirnfläche ausgetretenen Feldlinien der magnetischen Generatorwelle in den vorbeistreichenden Kupplungsbolzen, vergleichbar mit der Wicklung eines Kurzschlussläufers, einen gigantischen Kurzschlussstrom induziert haben müssen, der sich über die Kupplungs- Planflächen geschlossen hatte und zu diesen Verschweißungen führte. Als Grund der Magnetisierung konnte ein Kurzschluss zwischen mehreren Läuferwindungen festgestellt werden.

Was mir aber in meiner beruflichen Praxis schon oft begegnet ist, waren magnetische Generatorläufer die aus Unachtsamkeit und Unkenntnis bei Revisionsarbeiten entstanden, weil in der Nähe des abgelegten Generatorläufers Elektroschweißarbeiten ausgeführt und dabei die Schweißkabel teilweise als Windung um die Läuferwelle herum gezogen wurden. Teilweise war der Magnetisierungsgrad so hoch, dass ein 500g Hammer an der Kupplungsfläche haften blieb. Egal was in Ihrem Kraftwerk während der Durchführung von Revisionsarbeiten passiert, keinesfalls darf ein Läufer mit magnetischer Welle ohne Entmagnetisierungs- Prozedur wieder eingebaut oder gar in Betrieb genommen werden. Auch dabei kann ich Sie unterstützen, denn ich habe schon eine Vielzahl von Generatorläufern entmagnetisiert.

Warum ist der Betrieb mit einem magnetischen Läufer gefährlich und was passiert dabei?

Gehen wir einmal von einem stark magnetisierten Generatorläufer aus, dessen Kupplung zusätzlich in einem magnetisch leitfähigen Schutzgehäuse läuft.



Das nebenstehende Bild zeigt diese Anordnung. Bei einer magnetischen Welle verlaufen die Feldlinien zunächst geradlinig in der Läuferwelle. Kommt nun dieser Welle eine ebenfalls magnetisch leitfähige Komponente sehr nahe, tritt ein Teil der Feldlinien radial aus der Welle aus und verläuft weiter in der leitfähigen Komponente in Richtung des Maschinengrundrahmens.

In unserem Beispiel ist eine dieser Komponenten der antriebsseitige Lagerbock und die andere der Kupplungsschutz.

Durch diese Richtungsänderung in der Läuferwelle wird in diesem Bereich der Wellenoberfläche eine weitere Spannung erzeugt, die Unipolarspannung. Diese Spannung beschränkt sich nur auf den Bereich, indem die Feldlinien radial aus der Welle

austreten. Immer wenn dieser Wellenbereich mit der Lagerschale Berührungskontakt erhält, fließt der im Bild grün dargestellte Unipolarstrom. Obwohl dieser Strom keinesfalls den Energiegehalt besitzt wie der durch magnetische Asymmetrien verursachte Strom, hinterlässt er dennoch sichtbare Strommarken in der Lageroberfläche.

Der gleiche physikalische Vorgang kann auch im Kupplungsbereich stattfinden, wenn sich in der Nähe der Kupplungs-Stirnfläche magnetisch leitfähiges Material befindet. Das ist auch die physikalische Erklärung für das vorstehend angeführte Beispiel der aneinander geschweißten Kupplungshälften.

Evtl. vorhandene Unipolarspannungen haben sehr kleine Spannungsbeträge und lassen sich auch wegen der meistens unzugänglichen Wellenbereiche schlecht messen.

Es dürfte aber keine besondere technische Herausforderung sein, mit einfachen Mitteln festzustellen, ob eine Welle magnetisch ist oder nicht.

Zur Einflussgröße c).

Entgegen der magnetisch erzeugten Wellenspannung können auch elektrostatisch bedingte Spannung durch Reibung des Dampfstroms an den Turbinenschaufeln entstehen. Aus diesem Grund kann diese Art von Wellenspannungen auch an Verdichter- Anlagen auftreten, die von Dampfturbinen angetrieben werden, ohne dass der Wellenstrang eine elektrische Maschine enthält.

Diese Aufladungen sind entgegen den magnetisch induzierten Wellenspannungen nicht sinusförmig, sondern als Gleichspannung eher sägezahnförmig und in ihrer Höhe theoretisch unbegrenzt. Diese Ladespannung steigt linear an, bis die elektrische Feldstärke an irgendeiner Stelle des Wellenstranges die Durchschlagspannung erreicht und sich die gespeicherte Energie in Form eines Stromstoßes entladen kann.

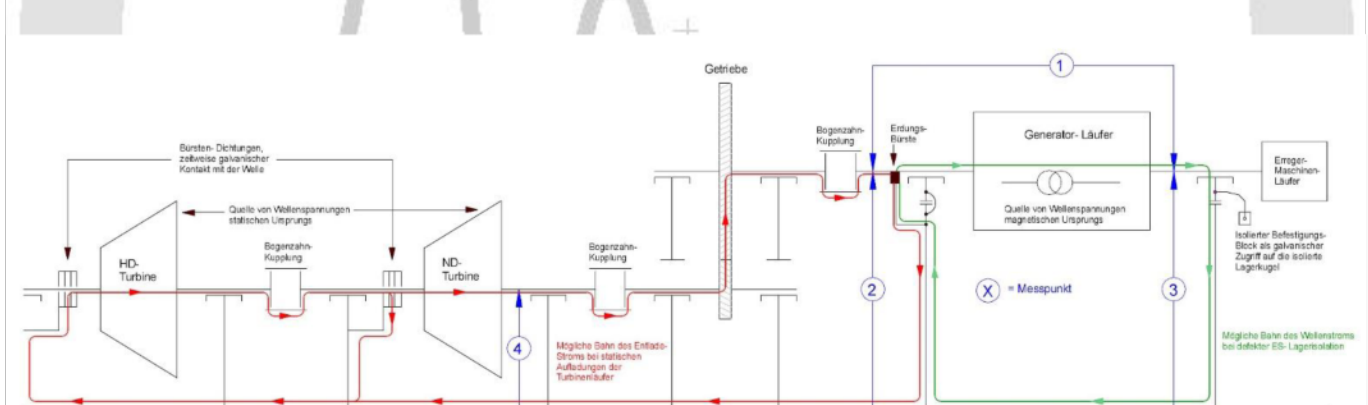
Da sich die elektrische Feldstärke aus dem Quotienten aus *Spannung / Abstand* ergibt, ist diese an der Stelle am größten, an der der Ölfilm am dünnsten ist. In dieser Tatsache liegt auch die Begründung dafür, dass die Beschädigungen durch statische Aufladungen prinzipiell nicht in den Lagerauflflächen, sondern überwiegend an den Verzahnungen von Getrieberädern und Bogenzahnkupplungen auftreten.

Während man bei magnetisch induzierten Wellenspannungen als Schutzmaßnahme definierte Isolationsstellen vorsieht, hilft diese Maßnahme bei statischen bedingten Wellenspannungen nicht.

Als Schutzmaßnahme muss, analog eines „Blitzableiters“ eine definierte Ableitungsstelle an der Turbinenwelle vorgesehen werden, die nach Möglichkeit aus der Sicht des Turbinenläufers vor der Bogenzahnkupplung und dem Getriebe angeordnet sein muss.

Diese Ableitstelle kann unter der Berücksichtigung der Zugänglichkeit und der lokalen Wellentemperatur mit normalen Zweischichtbürsten oder metallische Sonderbürsten erfolgen.

Die vorstehenden Aussagen sollen an einem praktischen Beispiel verdeutlicht werden. Vor geringer Zeit wurde mein Ingenieurbüro mit einer Wellenstrom- Untersuchung an einem 30 MVA Turbosatz beauftragt. Die nachfolgende Skizze zeigt die Aufbaustruktur des Maschinensatzes.



Die mechanische Konstellation bestand aus einer baulich getrennten Hoch- und Niederdruckturbine, die über eine Doppelverzahnungskupplung verbunden waren.

Diese Turbinenkombination war wiederum über eine Doppelverzahnungskupplung mit dem Ritzel eines Stirnradgetriebes verbunden. Zwischen dem Getriebe- Rad und dem Generator befand sich eine weitere Doppelverzahnungskupplung.

Der gesamte Wellenstrang war nur sichtbar am nicht isolierten Lagerbock des antriebsseitigen Generatorlagers mit einer so genannten Zweischichtbürste geerdet.

Grund der Wellenstrom- Überprüfung waren Revisionsbefunde, die an den Verzahnungen der Bogenzahnkupplungen Strommarken mit teilweise erosiven Ausmaß ergaben.

Zunächst wurde davon ausgegangen, dass als Ursache der festgestellten Strommarken eine im Inneren des Generators induzierte Wellenspannung ist, die über einen möglichen Isolationsfehler am erregenseitigen Lagerbock einen Wellenstrom treiben kann, der über die Getriebeverzahnung oder möglicherweise auch über eines der Turbinenlager wieder zurück zum Generator ES- Lager fließt.

Um diese Vermutung zu bestätigen, wurden die Messpunkte 1 – 4 festgelegt und an diesen entsprechende Messungen durchgeführt.

Entgegen den Erwartungen waren an der Messstelle 1 nur Wellenspannungen im mV- Bereich als AC- Größen messbar. DC- Größen waren nicht messbar.

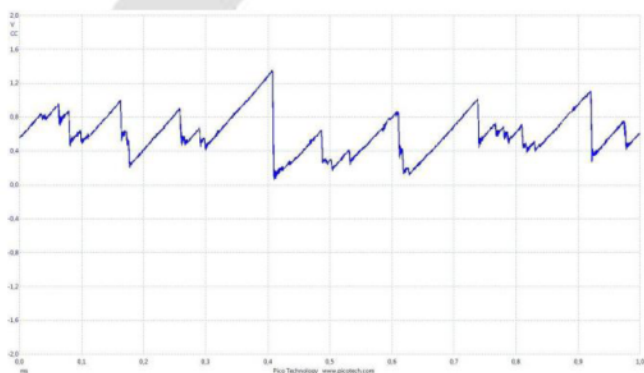
Auch an den Messpunkten 2 und 3 waren, bei aufgesetzter und abgehobener Erdungsbürste, ebenfalls nur Spannungen im mV- Bereich und auch keine nennenswerten Ableitströme messbar.

Aus diesen Messergebnissen ergab sich nun der Sachverhalt, dass der Generator im inneren mechanischen Aufbau sowie seines magnetischen Kreises eine außerordentliche Symmetrie aufweisen muss, denn nur dadurch sind die geringen Wellenspannungswerte erklärbar.

Das weitaus größere Problem bestand nun darin, dass vom Generator ausgehend keine Wellenströme nachweisbar waren, aber die Bogenzahnkupplungen trotzdem nicht unerhebliche Strommarken aufwiesen.

Da die Messungen mit Dreheisen- und Drehspulmesswerken keine brauchbaren bzw. reproduzierbaren Ergebnisse lieferten, wurde der Versuch unternommen, das was in irgendeiner Kurvenform an der Welle anstand, mir einer oszillografischen Messung in der Zeitebene abzubilden.

Zunächst wurde an der Messstelle 4 gemessen, wobei bei die Erdungsbürste an Messstelle 2 aufgelegt war.

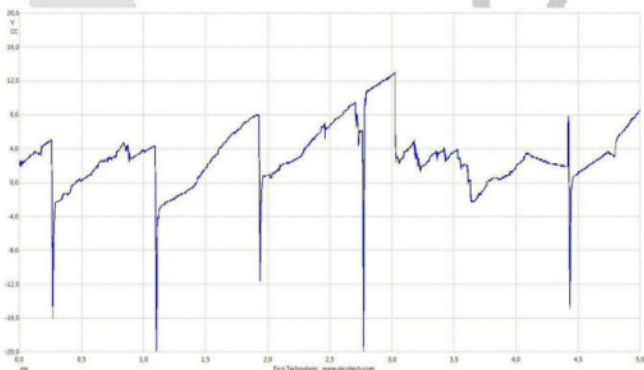


Die nebenstehende Darstellung der Wellenspannung an der Messstelle 4 zeigt keinen sinusförmigen Verlauf, der auf evtl. magnetische Ursachen hindeutet, sondern einen rein linear verlaufenden Aufladungsvorgang, der nach Erreichen einer Ladespannung von 1,2 bis 1,4 V in Form eines Durchschlages entladen wird.

Die Wiederholfrequenz beträgt ca. 1 ms, d.h. es handelt sich dabei um ein mit 1kHz prasselndes „Feuerwerk“ an der Überschlagsstelle.

Wo sich diese Stelle befindet, kann aus dieser Messung zunächst nicht abgeleitet werden.

Daraufhin wurde die Erdungsbürste an der Messstelle 2 abgehoben und die oszillografische Messung an der Messstelle 4 wiederholt.



Das nebenstehende Bild zeigt zunächst einen ähnlichen Verlauf der statischen Aufladung.

Der Unterschied besteht jedoch darin, dass die Ladespannung mit ca. 13 V deutlich größer ist als mit aufgelegter Erdungsbürste.

Die Ursache dafür liegt vermutlich darin, dass die Ladung einen anderen Entladungspunkt entlang des Wellenstrangs suchen muss, bei dem eine höhere Feldstärke zur Einleitung eines Überschlages erforderlich ist.

Damit ist zunächst ein direkter Zusammenhang zwischen der Erdungsbürste und der gemessenen Ladespannung nachgewiesen.

Im Umkehrschluss bedeutet dies aber, dass die Entladung über die Erdungsbürste stattfinden muss. Damit die Ladungs-Energie aber von ihrer Quelle, dem Turbinenläufer, zur Erdungsbürste gelangen kann, müssen die Ölfilme zwischen den Kupplungs- und Getriebeverzahnungen zunächst durchschlagen werden.

Die möglichen Strombahnen sind in der vorstehenden Grafik mit den roten Linienverläufen dargestellt.

Damit stehen die festgestellten Schadensbilder an den Verzahnungen und die oszilloskopisch gemessenen Spannungen wieder in einem kausalen Zusammenhang, so das festgestellte Gesamtbild logisch erklärbar ist.

Als Abhilfemaßnahmen sollten aus der Richtung des Turbinenläufers betrachtet, vor und nach Verzahnungskupplungen und Getrieben Wellenerdungsbürsten angebracht werden, damit sich evtl. Entladeströme an diesen definierten Stellen ausgleichen können.

Damit wurde nachgewiesen, dass auch statische Aufladungen in Turbinenläufern durchaus ein erosives Zerstörungspotential aufweisen können.

Das vorstehende Beispiel aus der Praxis sollte dazu beitragen, die theoretischen Betrachtungen über die verschiedenen Entstehungsursachen von Wellenspannungen und Wellenströmen zu ergänzen.

Zu der Entstehungsursache d)

Wird die Erregerwicklung eines Synchrongenerator direkt aus einer Thyristor- Gleichrichterbrücke gespeist, so liegt an der Läuferwicklung nicht nur ein reines Gleichspannungs- Potential an, sondern über die Läufer / Erdkapazität auch höherfrequente Wechselfspannungsanteile, die sich aus der Gleichrichter- Oberwelle und den Phasenanschnitts- Gradienten dU/dt ergeben. Diese meist nicht sinusförmigen Spannungen übertragen sich zum geringen Teil über die Wicklungs / Erdkapazität der Läuferwicklung auf die Läuferwelle und stehen somit bei defekter Wellenerdungsbürste als Wellenspannung an und sind auch an der Läuferwelle messbar.

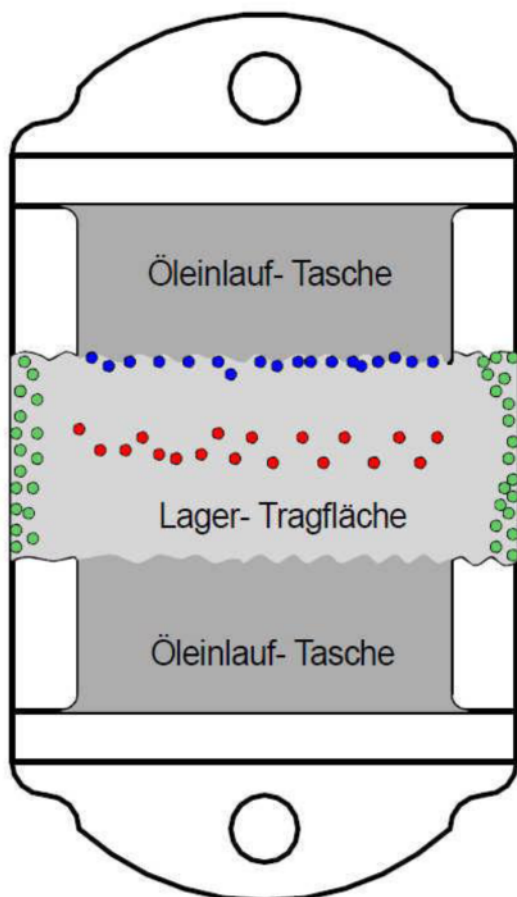
Zum einen haben die von der statischen Erregung eingebrachten höherfrequenten Impulse einen relativ niedrigen Energiegehalt, können aber bei unsachgemäßer Wellenerdung trotzdem ein gewisses Zerstörungspotential auf Getriebe- und Kupplungsverzahnungen sowie auch auf Lager- Laufflächen entwickeln.

Bei korrekter Erdung der Läuferwelle, vor allen Dingen auch mit den dafür geeigneten Bürsten, kann eine Gefährdung durch diese kapazitiv übertragenen Wellenspannungen prinzipiell ausgeschlossen werden.

Wenn man nun im Verlauf einer Generatorrevision oder einer Lagerkontrolle Strommarken im Tragbereich des Lagers feststellt, ist dies zunächst ein Hinweis darauf, dass irgendetwas während der Betriebszeit der Maschine nicht in Ordnung war.

Allerdings lassen die Lagen der Strommarken gewisse Rückschlüsse darauf zu, welche der vorstehend beschriebenen Entstehungsursachen möglicherweise für diese Strommarken verantwortlich waren.

Blick in eine Lager- Unterschale



Die nebenstehende Skizze zeigt den Blick in eine Lager-Unterschale, bei ausgebauter Läuferwelle.

Die dunkelgrau markierten Bereiche sind die sogenannten Öleinlauffaschen. Die hellgraue Fläche zeigt das eigentliche Tragbild des Lagers.

Auffällig dabei ist, dass die grünen Strommarken nur in den Endbereichen der Lagerschale zu finden sind. In der vorstehenden Grafik sind die Unipolarströme ebenfalls grün dargestellt.

Wie bereits ausgeführt, werden die Unipolarströme von der Lagerisolation nicht beeinflusst und treten nur in den Randbereichen der Lagerlauffläche aus der Wellenoberfläche aus.

Wenn Sie also nur in den Randbereichen Strommarken finden, sind diese vermutlich unipolaren Ursprungs. Allerdings setzt das auch eine magnetisierte Welle voraus.

Die roten Marken sind in der eigentlichen Lauffläche, meistens über die Lagerbreite verteilt. Die Strommarken befinden sich immer da, wo der Ölfilm gerade mal am dünnsten war und die Wellenspannung diesen durchschlagen konnte. Diese Marken haben ihre Ursache in den magnetischen Asymmetrien, aber sie können nur entstehen, wenn die erregerseitige Lager- Isolation an einer Stelle defekt ist.

Als letztes noch einige Bemerkungen zu den blau dargestellten Marken.

Diese haben in der Regel keine elektrischen Ursachen, sehen aber optisch den Strommarken sehr ähnlich.

Dabei handelt es um Kavitation, d.h. Auswaschungen des Lagermetalls durch Ölströmungswirbel.

Logischerweise treten diese Erscheinungen dort auf, wo die größte Strömungsbeschleunigung bzw. die größten Druckdifferenzen auf kleinstem Abstand zueinander vorhanden sind, also an der Kante des Tragbildes zur Öleinlauffasche.

Wie Sie sehen, kann das geübte Auge am Tragbild, welches Strommarken enthält, bereits eine Vermutung auf evtl. Ursachen treffen.

3. Erdungsproblematik des gesamten Wellenstranges

Da früher in allen Kraftwerken weltweit häufig Probleme mit der Wellenerdung auftraten, bekam ich von meinem damaligen Arbeitgeber den Auftrag durch eine Versuchsreihe herauszufinden, welche der zu dieser Zeit vorhandenen Elektrographit-, Naturgraphit- oder Metallgrafit- Bürsten am besten für die Erdung von Wellen geeignet waren.

Um das Ergebnis gleich vorwegzunehmen, es war keine dieser Kohlebürsten zur Wellenerdung geeignet.

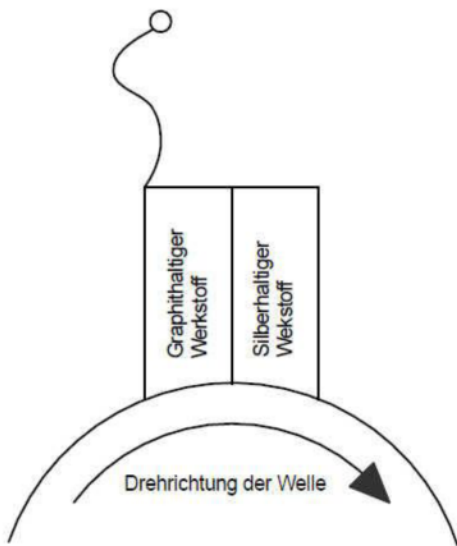
Die Problematik bestand darin, dass jede dieser Bürstentypen eine gewisse Mindeststromdichte zur Aufrechterhaltung einer stabilen Kontaktgabe mit der Wellenoberfläche benötigt.

Im stromlosen Betrieb als Erdungsbürste veränderte sich der Kontaktwiderstand zur Welle innerhalb weniger Stunden vom Ohm- Bereich in den kOhm- Bereich.

Das heißt die Bürste ist zwar körperlich vorhanden, aber elektrisch nicht mehr wirksam, so dass statische Aufladungen oder auftretende Ströme nicht mehr um das jeweilige Lager herum geleitet werden konnten.

Eine wirksame Abhilfe kam erst mit der Einführung der so genannten Zweischicht- Bürste. Versuche haben gezeigt, dass diese Verbundstruktur lange Zeit niederohmig bleibt und somit geeignet ist, statische Aufladungen und evtl. auftretende Ströme in kleinen Bereichen um das Lager herum zu leiten.

Das funktioniert aber nur, wenn die Bürste so angeordnet ist, wie nachfolgend skizziert.



Um einen niederohmigen und langlebigen Stromübergang zwischen der Bürstenauflfläche und der Wellenoberfläche zu garantieren, muss unbedingt darauf geachtet werden, dass die Welle in Bewegungsrichtung erst den graphithaltigen und danach den silberhaltigen Teil der Bürste berührt.

Der silberhaltige Werkstoff ist für Spannungsableitung zuständig und garantiert auch die Ableitung geringster Ströme.

Der graphithaltige Werkstoff sorgt mit seinen mineralischen Bestandteilen dafür, dass eventuelle Ölschichten auf der Lauf- Spur entfernt werden und somit eine sichere Stromübertragung gewährleistet ist.

Zur besseren Zuordnung der ganzen Problematik, das nachfolgende Foto eines mit Wellenstrom beaufschlagten Getrieberades.

[das nachfolgende Bild wurde der Allianz- Zeitschrift „Der Maschinenschaden“ 42 (1969) Heft 2 entnommen]

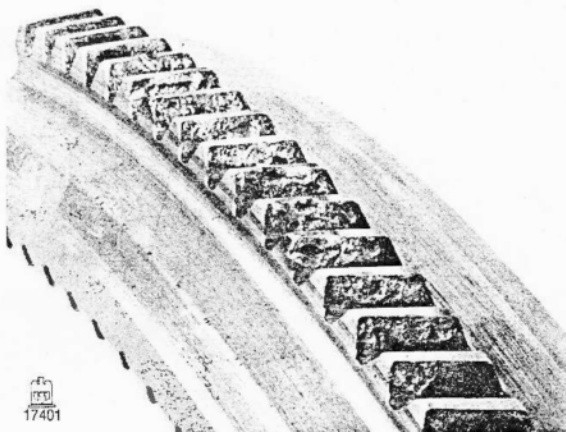


Bild 2. Verzahnung des nicht gebrochenen Außenrades mit gleichartigen Verfärbungen, Aufschmelzerscheinungen und Verformungen wie Bild 1.