

# Umweltverträgliche Harzimprägnierung elektrischer Maschinen mittels Stromwärme

W. Schmidt et al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**62/2006**

**Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

# Umweltverträgliche Harzimprägnierung elektrischer Maschinen mittels Stromwärme

## **Projektleitung**

Dipl.Ing. Walter Schmidt  
*ELIN EBG Motoren GmbH*

## **Projektmitarbeiter**

Dipl.Ing. Hans Georg Boldlehner, Dipl.Ing. Christian Mann,  
Dipl.Ing. Michael Nast, Dipl.Ing. Schmid Reinhard,  
Dipl.Ing. Bernhard Pertl, Ing. Stefan Meister  
*ELIN EBG Motoren GmbH*

Ao. Univ.-Prof. Dr. Techn. Dipl.-Ing. Hansjörg Kofler  
*Institut für Elektrische Maschinen und Antriebstechnik*

Dipl.Ing. Elke Bäuerle  
*Gottlob Thumm GmbH*

Weiz, Jänner 2006

**Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie**



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage [www.FABRIKderZukunft.at](http://www.FABRIKderZukunft.at) und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>KURZFASSUNG 1 SEITE (DEUTSCH)</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>KURZFASSUNG 1 SEITE (ENGLISCH)</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>KURZFASSUNG 5 SEITEN (DEUTSCH)</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>KURZFASSUNG 5 SEITEN (ENGLISCH)</b> .....	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>17</b>
5.1	PROBLEMBESCHREIBUNG.....	17
5.2	ALLGEMEINE EINFÜHRUNG IN DIE THEMATIK .....	18
5.2.1	<i>Kurze Details zur Hochspannungsspule</i> .....	22
5.3	ZIELE DES GEGENSTÄNDLICHEN PROJEKTES .....	23
5.3.1	<i>Allgemeines</i> .....	23
5.3.2	<i>Technisch-wissenschaftliche Ziele</i> .....	23
5.3.3	<i>Warum ist dieses Projekt im Rahmen der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ von Interesse?</i> .....	24
5.3.4	<i>Technologie und Innovationen bei Produktionsprozessen</i> .....	25
5.4	MARKTBETRACHTUNG WINDKRAFT .....	28
5.4.1	<i>Übersicht über den Windmarkt</i> .....	30
<b>6</b>	<b>HARZVERGLEICH UND HARZAUSWAHL</b> .....	<b>32</b>
6.1	ALLGEMEINES.....	32
6.2	HARZÜBERBLICK .....	32
6.3	TECHNISCHER VERGLEICH DER HARZE UND EINSATZGEBIET .....	34
6.4	SCHRUMPFUNGSVERHALTEN .....	35
6.5	STATISCHE 3-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG.....	37
6.6	GLASÜBERGANGSPUNKT .....	37
6.7	THERMISCH MECHANISCHE ANALYSE (TMA) .....	38
6.7.1	<i>Temperaturbeständigkeit</i> .....	39
6.8	VISKOSITÄT .....	39
6.9	ZUSAMMENFASSUNG – HARZAUSWAHL UND HARZVERGLEICH .....	42
<b>7</b>	<b>TECHNISCHER TEIL - NIEDERSPANNUNGSRUNDDRAHTWICKLUNG</b> .....	<b>43</b>
7.1	IMPRÄGNIERUNG VON KLEINEN STATOREN MITTELS STROMWÄRMETECHNOLOGIE .....	43
7.2	DER KR-FAKTOR .....	47
7.3	ERWÄRMUNG DES BLECHPAKETES .....	48
7.3.1	<i>Erwärmung mittels MF Induktion</i> .....	48
7.3.2	<i>Erwärmung mittels HF</i> .....	49
7.4	VERHALTEN IM STEADY-STATE.....	51
7.5	DIELEKTRISCHE MESSUNGEN .....	52
7.6	TRÄNKVERSUCHE MIT DOBEKAN FT 2015/60 EK .....	53
7.7	HARZBELASTUNG .....	54
7.8	UMRICHTERTAUGLICHKEIT.....	55
7.8.1	<i>Teilentladung</i> .....	56
7.9	ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN - SILIKONHARZSYSTEME .....	58
7.10	ZUSAMMENFASSUNG - NIEDERSPANNUNGSRUNDDRAHTWICKLUNG .....	60
<b>8</b>	<b>TECHNISCHER TEIL - NIEDERSPANNUNGSFORMSPULENWICKLUNG</b> .....	<b>61</b>
8.1	DAUERTEMPERATURVERSUCHE .....	61
8.2	SPANNUNGSVERSUCHE AN NS-FORMSPULEN, GETRÄNKT MITTELS STROM-UV-VERFAHREN.....	64
8.3	ZUSAMMENFASSUNG – NIEDERSPANNUNGSFORMSPULENWICKLUNG .....	67
<b>9</b>	<b>TECHNISCHER TEIL - HOCHSPANNUNGSFORMSPULENWICKLUNG</b> .....	<b>68</b>
9.1	STROMKRÄFTE AM WICKELKOPF.....	68
9.1.1	<i>Ergebnis</i> .....	72
9.2	ERWÄRMUNG VON HS – SPULEN DURCH STROMWÄRME .....	73
9.2.1	<i>Erste Versuche</i> .....	73

9.2.2	<i>Weitere Imprägnierversuche mit HS Spulen</i> .....	75
9.3	ZUSAMMENFASSUNG – HOCHSPANNUNGSFORMSPULENWICKLUNG .....	77
<b>10</b>	<b>STROM UV ANLAGE</b> .....	<b>78</b>
10.1	ENERGIEVERBRAUCH.....	79
10.2	ANGABEN ZUR EMISSION DER GEPLANTEN STROM UV ANLAGE .....	79
10.2.1	<i>Einsatz eines monomerfreien Harzes – Abschätzung der Emissionen</i> .....	79
10.2.2	<i>Einsatz von DOBEKAN FT2015/60EK UV – Abschätzung der Emissionen</i> .....	80
<b>11</b>	<b>WEITERE VORTEILE DER STROM UV-TECHNOLOGIE</b> .....	<b>81</b>
11.1	OPTISCHE BEURTEILUNG DER TRÄNKQUALITÄT.....	81
11.2	EINZIEHEN DER PAKETE OHNE NACHBEHANDLUNG.....	82
<b>12</b>	<b>CONCLUSIO</b> .....	<b>84</b>
<b>13</b>	<b>LITERATURLISTE</b> .....	<b>87</b>
<b>14</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>88</b>
<b>15</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>90</b>

# 1 KURZFASSUNG 1 Seite (DEUTSCH)

## **Ausgangssituation:**

Das derzeit in der Elektroindustrie übliche Verfahren für die Harz-Imprägnierung ist das VPI-Verfahren (vacuum pressure impregnation). Bei diesem Verfahren werden die zu imprägnierenden Objekte wie z. B. Windkraftstatoren unter Vakuum gesetzt und mit einem Tränkharz geflutet. Schließlich wird der Stator in einen Umluftofen gebracht, wo das Harz bei Temperaturen ab 80°C bis 100°C zu gelieren beginnt und nach einigen Stunden zu einer festen Masse durchgehärtet ist. Bei großen Windkraftstatoren dauert es jedoch Stunden bis die Temperatur erreicht ist, wo das Harz zu gelieren beginnt und so kann während dieser Zeit bis zu 50 % des Harzes wieder aus der Wicklung auslaufen. Das Tränkharz härtet bei 150°C schließlich zu einem vernetzten und sehr festen Formstoff aus, welcher zur Isolation und mechanischen Verstärkung der Wicklung dient und Schutz vor Umwelteinflüssen (z.B. Feuchtigkeit) bietet.

## **Inhalte und Zielsetzungen:**

Im gegenständlichen Projekt wird ein neues Verfahren, genannt Strom-UV-Verfahren, welches den Stromwärmeeffekt (bzw. Joule-Effekt) ausnützen soll auf die Eignung zur Imprägnierung von großen Windkraftstatoren hin untersucht werden. Technische Probleme sollen soweit abgeklärt werden dass eine geeignete Anlage dimensioniert werden kann. Dieses neue Verfahren verspricht eine enorme Energieeinsparung aufgrund des sehr großen Wirkungsgrades von etwa 97 % beim Erwärmen eines Stators mittels Stromwärme (Widerstandsheizung). Ein Umluftofen hat nur einen Wirkungsgrad von etwa 40 %. Ein weiterer Vorteil ist die sehr schnelle Aufwärmzeit – die Wicklung kann innerhalb von Minuten auf Temperatur gebracht werden – so dass die Gelierung des Harzes so früh einsetzt dass praktisch kein unreakiertes Harz mehr aus der Wicklung tropft. Auch die Emission an organischen flüchtigen Verbindungen wird dadurch sehr stark zurückgedrängt. Die Vorteile dieser Technologie sollen im gegenständlichen Projekt verifiziert werden bzw. durch Versuche belegt werden. Die Anwendbarkeit für große Windkraftstatoren (in Runddraht- sowie Formspulenausführung) soll durch theoretische und praktische Untersuchungen belegt werden um eine geeignete Strom-UV-Anlage zu planen.

## **Ergebnisse**

Ausführliche theoretische und praktische Betrachtungen belegen die Anwendbarkeit des Strom-UV-Verfahrens für große Windkraftstatoren, im speziellen von Windkraftstatoren bis zu mehreren Megawatt Leistung in Formspulenausführung. Die Vorteile des Strom-UV-Verfahrens, wie geringer Stromverbrauch (Stromeinsparung ca. 70%), Emissionsverringerung auf bis zu ein zehntel (im Vergleich zum herkömmlichen VPI-Verfahren) sowie die gute Imprägnierqualität können durch umfangreiche Versuchsreihen belegt werden. Auch die Zukunftscompatibilität des Verfahrens gilt als sicher. Es wurde Grundlagenforschung bezüglich der Anwendung des Strom-UV-Verfahrens zur Imprägnierung von Hochspannungsspulen betrieben. Die ersten Ergebnisse ermuntern zu einer weiterführenden Betrachtung. Das Hauptziel des gegenständlichen Projektes, die Errichtung einer Strom-UV-Anlage ist erreicht. Eine derartige Anlage wurde dimensioniert und soll im Zuge eines Demonstrationsprojektes („Fabrik der Zukunft“, 4. Ausschreibung) in Weiz bei der ELIN EBG Motoren GmbH errichtet werden.

## 2 KURZFASSUNG 1 Seite (ENGLISCH)

### Actual Situation:

The state of the art technology of impregnating rotating machines and electrical generators is the VPI process (vacuum pressure impregnation).

The objects to be impregnated (for example stators for wind power) are evacuated and then flooded with an impregnating resin. Then, the stator is transported to a convection oven, where the resin gels at 80°C to 100°C and then hardens through within a few hours.

When impregnating big stators it may take hours for the resin to reach hardening temperature, so up to approximately 50% of the resin may leak out of the winding. Finally, the resin hardens at 150°C to a cross-linked and therefore hard material, which primarily improves the insulation and increases the hardness of the winding but also protects it from environmental stress.

### Contents and Targets:

A new procedure of impregnating wind power stators using the joule effect (in German “Strom – UV – Verfahren”) has to be investigated. Technical problems have to be tackled in order to design for a suitable impregnation facility.

An advantage of heating stators by current supply is the high efficiency of 97% as opposed to approximately 40% efficiency of a typical forced-air oven. Energy consumption is reduced by 70%. A reduction of emission of at least 70% is feasible.

This is due to the fact, that that gelling temperature can be reached very quickly. Therefore, the resin is gelling very fast and almost no fluid resin may drop out of the slots.

The advantages of this technology have to be verified and proven by investigations. The applicability of this technology for impregnating large wind power stators in round wire or form wound coil design will be verified by theoretical and practical tests.

### Results:

Detailed theoretical and practical examinations have proven the applicability of this new technology for wind power stators, especially for wind power stators up to several megawatts completed in form wound coil design.

The advantages of this technology using the joule effect, which have been proved by extensive testing, are among others: a raise of energy efficiency, emission reduction to 1/10 of the emission caused by the VPI process and the better impregnation quality. The compatibility for future use is also certain.

Furthermore, fundamental research to adapt this technology to high voltage coils has been done, the results encourage continuing the investigations.

The main goal of the project at hand – the installation of a new impregnation facility - has been reached. Such a facility has been designed and will be installed in Weiz in the ELIN EBG Motoren GmbH in the course of the demonstration project “Factory of Tomorrow – 4<sup>th</sup> call”.

### **3 KURZFASSUNG 5 Seiten (DEUTSCH)**

#### **Ausgangssituation**

Das derzeit in der Elektroindustrie übliche Verfahren für die Harz-Imprägnierung ist das VPI-Verfahren (vacuum pressure impregnation). Bei diesem Verfahren werden die zu imprägnierenden Objekte wie z. B. Windkraftstatoren unter Vakuum gesetzt und mit einem Tränkharz geflutet. Schließlich wird der Stator in einen Umluftofen gebracht, wo das Harz bei Temperaturen ab 80°C bis 100°C zu gelieren beginnt und nach einigen Stunden zu einer festen Masse durchgehärtet ist. Bei großen Windkraftstatoren dauert es jedoch Stunden bis die Temperatur erreicht ist, wo das Harz zu gelieren beginnt und so kann während dieser Zeit bis zu 50 % des Harzes wieder aus der Wicklung auslaufen. Das Tränkharz härtet bei 150°C schließlich zu einem vernetzten und sehr festen Formstoff aus, welcher zur Isolation und mechanischen Verstärkung der Wicklung dient und Schutz vor Umwelteinflüssen (z.B. Feuchtigkeit) bietet.

Das VPI-Verfahren wurde für die Tränkung von Hochspannungsmaschinen entwickelt und wird unverändert schon seit langem auch für Niederspannungswicklungen eingesetzt. Aufgrund mehrerer technischer Gegebenheiten bietet dieses Verfahren jedoch keine ausreichend gute Tränkqualität für Runddraht-Niederspannungswicklungen, trotzdem findet dieses Verfahren weltweit Anwendung. Eine Druckphase (2 bis 4 bar), wie zur Imprägnierung von Hochspannungswicklungen üblich, ist bei Niederspannungs-Runddrahtstatoren nicht notwendig. Dennoch findet man viele Niederspannungs-VPI-Anlagen, bei welchen trotzdem auf die Druckphase nicht verzichtet wird. Es gibt im Gegensatz dazu aber auch Anlagen, welche auf die aufwändige Vakuumtechnologie verzichten und Statoren nur durch so genanntes Träufeln imprägnieren (Träufelanlagen) teilweise durch Wärmen der Wicklung mittels Stromwärme. Die so getränkten Statoren müssen im Ofen ausgehärtet werden.

#### **Inhalte und Zielsetzungen**

Das gegenständliche Projekt zielt darauf ab eine neue innovative, ökoeffiziente Technologie, die Strom-UV-Technologie auf die Eignung für den Einsatz zur Tränkung von großen Runddrahtgeneratoren sowie Formspulengeneratoren zu überprüfen bzw. Lösungen für technische Probleme zu erarbeiten.

Dieses neue Verfahren verspricht eine enorme Energieeinsparung aufgrund des sehr großen Wirkungsgrades von etwa 97 % beim Erwärmen eines Stators mittels Stromwärme (Widerstandsheizung). Ein Umluftofen hat nur einen Wirkungsgrad von etwa 40 %. Ein weiterer Vorteil ist die sehr schnelle Aufwärmzeit – die Wicklung kann innerhalb von Minuten auf Temperatur gebracht werden – so dass die Gelierung des Harzes so früh einsetzt dass praktisch kein unreakiertes Harz mehr aus der Wicklung tropft. Im Gegensatz dazu laufen beim VPI-Verfahren bei Härtung der Objekte im Umluftofen bis 50 % an Harz wieder aus der Wicklung aus. Die Emission an organischen flüchtigen Verbindungen soll durch die neue Technologie stark vermindert werden.

Die Vorteile des Strom-UV-Verfahrens sollen im gegenständlichen Projekt verifiziert werden bzw. durch Versuche belegt werden. Die Anwendbarkeit für große Windkraftstatoren (in Runddraht- sowie Formspulenausführung) soll durch theoretische und praktische Untersuchungen belegt werden. Da bei Formspulen die Teilleiterisolation aus einer empfindlichen Feinglimmerisolation besteht, war hier besonders Augenmerk darauf zu legen, dass diese durch die Beanspruchung bei der Stromwärmetechnologie nicht Schaden nimmt. Denkbar

wäre eine Delaminierung durch das schnelle Aufwärmen bzw. das Auftreten punktueller Temperaturüberlastungen. Technische Probleme sollen soweit abgeklärt werden dass eine geeignete Anlage dimensioniert werden kann.

Eine enge Zusammenarbeit mit marktrelevanten Zielgruppen ist ein sehr wichtiger Punkt des Projektes. In Bezug auf die Windenergie ist die langjährige Partnerschaft mit dem Marktführer Fa. *NEG MICON* von enormem Vorteil. Der Windkraftanlagenhersteller *VESTAS Wind-systems A/S* hat es ermöglicht mehrere Statoren bei der Fa. *Thumm* auf der Versuchstränkanlage im Strom-UV-Verfahren zu tränken um dabei die nötigen Erfahrungen zu sammeln.

Als zweitrangiges Ziel sollte untersucht werden ob das Strom-UV-Verfahren auch im Hochspannungsbereich eingesetzt werden könnte. Erste Versuche sollten zeigen, welche technischen Probleme im Hochspannungsbereich zu erwarten sind und ob weitergehende Forschung auf diesem Gebiet sinnvoll erscheinen.

### **Methoden der Bearbeitung**

Mehrere Niederspannungs-Runddraht-Statoren wurden mit dem neuen Strom-UV-Verfahren getränkt und mit herkömmlich getränkten Statoren verglichen. Für die Tränkung großer Objekte, wie z.B. Windkraftstatoren mit Leiterquerschnitten um die  $250 \text{ mm}^2$ , und einer Leistung ab 900 kW, hat die Firma Gottlob Thumm GmbH eine eigene Versuchstränkanlage mit entsprechend dimensioniertem Transformator und Steuerung errichtet.

Die getränkten Objekte wurden optisch begutachtet und einer ausführlichen elektrischen Prüfung unterworfen.

Die wichtigsten Untersuchungen waren die Erwärmung der Generatoren beim Betrieb im Steady-State und das Verhalten bei Spannungsspitzen (dielektrische Untersuchungen).

Wichtige theoretische Betrachtungen ergaben sich durch die Zusammenarbeit mit dem Institut für elektrische Maschinen und Antriebstechnik der TU Graz, welches sich mit der Problematik der Stromkräfte bei Formspulen beschäftigte. Diese Arbeit bildet die Grundlage für die Dimensionierung einer Strom-UV-Anlage für die Imprägnierung von Formspulengeneratoren.

Dauertemperaturversuche waren notwendig um das Gesamtsystem „Formspule“ unter prolongierter Temperatureinwirkung bzw. Alterung zu testen um sicher zu stellen, dass durch die Belastung beim Imprägnierverfahren keine Vorschädigung des Materials eintritt. Teilweise dauern diese Versuche noch an.



Abbildung 1: Versuchstränkanlage bei der Firma Gottlob Thumm GmbH in Deutschland. Ein Stator eines Windgenerators wird zur Tränkung vorbereitet.

Last but not least sind die Versuche an unzähligen Einzelspulen zu nennen, welche hauptsächlich optisch beurteilt wurden (Schnittbilder) bzw. durch Wägung die Harzaufnahme bestimmt wurde. Manche Spulen wurden auch elektrisch vermessen (Durchschlag,  $\tan \delta$ )

Die imprägnierten Windkraftgeneratoren befinden sich inzwischen im Betrieb und funktionieren klaglos.

## Ergebnisse

### Erwärmungsläufe kleiner Maschinen

Verfahren	Harz	Pt-100	Pt-100	Pt-100	Pt-100	Pt-100	Pt-100	Pt-100	Pt-100	Pt-100	Pt-100	Mittl. Raum	Geh.	
		Nr. 1 AS	Nr. 2 AS	Nr. 3 AS	Nr. 4 BS	Nr. 5 BS	Nr. 6 BS	MW AS	MW BS	□ Nut	Erw.			
Strom-UV	Dobeckan MF 8001 UV	99,7	102,5	99,1	101,5	102,6	100,6	100,4	101,6	101,0	87,5	55,6	23,1	37,6
Strom-UV	Herberts E4011 UV	100,0	101,1	100,6	101,7	102,8	102,2	100,6	102,2	101,4	89,6	56,0	20,4	37,9
VPI herkömmlich	Dobeckan FT2015	101,0	101,0	101,0	106,0	108,0	105,0	101,0	106,3	103,7	91,0	58,0	23,0	38,5
Herkömmlich, ohne Vakuum	Herberts E4011/129	101,0	101,0	101,0	106,0	108,0	105,0	101,0	106,3	103,7	91,0	56,9	23,0	38,5

Tabelle 1: Temperaturen [in °C] aus den Erwärmungsläufen von Maschinen mit einer Leistung von 37 kW. Pt-100 Nr.1-3: Temperaturfühler im Wickelkopf auf der Antriebsseite (AS) (=Anschlussseite); Pt-100 Nr.4-6: Temperaturfühler im Wickelkopf auf der Bürstenseite (BS), Nut-Pt-100: Temperaturfühler 5 cm in einer Nut am Nutgrund; weiters sind die Temperaturen der Raumumgebung und des Gehäuses angegeben.

Bei kleinen Statorn mit einer Leistung von 37 kW zeigt sich eindeutig, dass mit Strom-UV-Verfahren getränkte Statorn um durchschnittlich 3 K kühler sind. Weiters ist zu bemerken, dass bei diesen Statorn ca. doppelt so viel Harz in der Wicklung verblieben ist.

## Erwärmungsläufe von Windkraftgeneratoren mit ca. 1 MW Leistung

Die Ergebnisse der Erwärmungsläufe von Windkraftstatoren mit ca. 1 MW Leistung führten Anfangs zu widersprüchlichen Ergebnissen. Es konnte vorerst nicht gezeigt werden, dass mit dem Strom-UV-Verfahren getränkte Statoren aufgrund der besseren Harzfällung einen besseren Wärmeübergang bieten und deshalb kühler bleiben sollten.

Bei genauerer Betrachtung zeigte sich, dass bei Statoren dieser Größenordnung andere Effekte eine viel größere Rolle spielen, wie z.B. der Effekt der Erwärmung durch Stromverdrängung, welcher davon Abhängt, wie die Einzelleiter in den Stator eingebaut sind.

Als Beurteilungskriterium für die Stromverdrängung wurde ein über eine Bohrungsfeldmessung zugänglicher Wert, der so genannte  $K_r$ -Faktor herangezogen. Die endgültige mittlere Erwärmung eines Generators korreliert mit diesem Faktor, allerdings ist mit den zur Verfügung stehenden statistischen Daten kein formelmäßiger Zusammenhang festzustellen. Es spielen auch andere Faktoren eine Rolle, welche im Zuge einer ausführlichen Betrachtung des  $K_r$ -Faktors eruiert werden konnten. Es sind dies Blechgüte, Stanzgrad der Bleche, die Art und Weise wie Einzelleiter in die Nut eingebaut sind und im geringen Umfang auch die Art der Rotortype.

## Dielektrische Messungen

In Abbildung 2 ist gut zu erkennen, dass beim Strom-UV-Verfahren, bedingt durch die gute Harzfällung, die Teilentladung erst viel später einsetzt und auch der Anstieg viel geringer ist. Die Absolutwerte der Verlustfaktormessung ( $\tan \delta$ ) unterscheiden sich, wie aus der Tabelle 2 ersichtlich, sehr stark. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zwei verschiedene Tränkharze verglichen wurden und diese Harze einen sehr unterschiedlichen Dielektrizitätsfaktor besitzen. Wesentlich ist jedoch nur der Anstieg des Verlustfaktors. Bei Hochspannungsspulen ist jedoch noch abzuklären, welchen Einfluss unterschiedliche Dielektrizitätsfaktoren bzw. dadurch bedingt die unterschiedlichen  $\tan \delta$ -Wertes haben. Es gibt noch kaum Untersuchungen zu diesem Thema.

Ein später und niedriger Anstieg des  $\tan \delta$ -Wertes bei der Verlustfaktormessung bedeutet, dass auch bei extremer Überbelastung des Generators bzw. der Maschine keine Schädigung des Isolationssystems zu erwarten ist, welches die Lebensdauer verkürzen könnte. Besonders bei Windgeneratoren könnten durch Windböen kurzzeitige Überbelastungen erwartet werden und daher ist hier ein geringer Anstieg von entscheidender Bedeutung bezüglich Lebensdauer der Wicklung.

Insbesondere auch für Maschinen, welche mit einem Umrichter betrieben werden, ist dieser Befund von sehr großem Interesse, da derartige Maschinen dauernd belastet werden und sich die Lebensdauer durch auftretende Teilentladung extrem verkürzen kann.

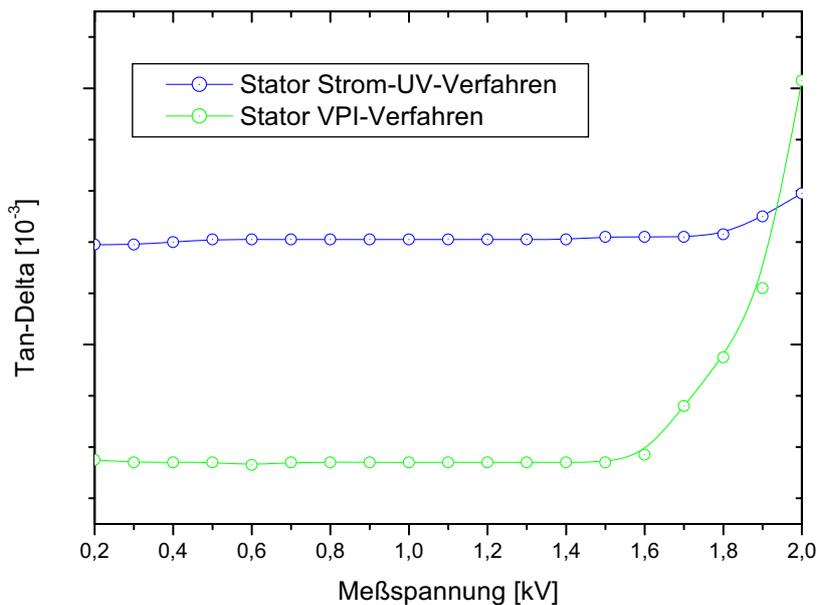


Abbildung 2:  
Dielektrische Messung zweier vergleichbarer Wicklungen, welche mittels zweier verschiedener Verfahren getränkt wurden. Für das VPI-Verfahren wurden ein UP-Harz mit Vinyltoluol verwendet, für das Strom-UV-Verfahren ein UP-Harz mit Acrylaten

### Weitere Ergebnisse

Im Zuge von Untersuchungen bezüglich Dauertemperaturbeständigkeit und Teilentladungsfestigkeit wurden zwei eigenständige interne Projekte gestartet, welche sich sehr intensiv mit diesem Thema befassen und immer noch andauern.

### **Schlussfolgerungen**

Ausführliche theoretische und praktische Betrachtungen belegen die Anwendbarkeit des Strom-UV-Verfahrens für große Windkraftstatoren, sowohl in Runddrahtausführung als auch im speziellen von Windkraftstatoren bis zu mehreren Megawatt Leistung in Formspulenausführung.

Die Vorteile des Strom-UV-Verfahrens, wie geringer Stromverbrauch (Stromeinsparung ca. 70%), Emissionsverringern auf bis zu ein zehntel (im Vergleich zum herkömmlichen VPI-Verfahren) sowie die gute Imprägnierqualität können durch umfangreiche Versuchsreihen belegt werden. Auch die Zukunftscompatibilität des Verfahrens gilt als sicher. Die gesamte Prozesszeit (Vorbereiten, Tränken, Aushärten) beträgt selbst bei großen Objekten nur 1,5 bis 2 Stunden, weiters ist die Imprägnierqualität überdurchschnittlich gut und sehr gleichmäßig.

Es wurde Grundlagenforschung bezüglich der Anwendung des Strom-UV-Verfahrens zur Imprägnierung von Hochspannungsspulen betrieben. Die ersten Ergebnisse ermuntern zu einer weiterführenden Betrachtung.

Das Hauptziel des gegenständlichen Projektes, die Umsetzung einer innovativen, ökoeffizienten Technologie ist erreicht. Eine Strom-UV-Anlage wurde bereits dimensioniert und soll im Zuge eines Demonstrationsprojektes („Fabrik der Zukunft“, 4. Ausschreibung) in Weiz bei der *ELIN EBG Motoren GmbH* errichtet werden.

## 4 KURZFASSUNG 5 Seiten (ENGLISCH)

### Actual Situation

The state of the art technology of impregnating rotating machines and electrical generators is the VPI process (vacuum pressure impregnation).

The objects to be impregnated (for example stators for wind power) are evacuated and then flooded with an impregnating resin. Then, the stator is transported to a convection oven, where the resin gels at 80°C to 100°C and then hardens through within a few hours.

When impregnating big stators it may take hours for the resin to reach hardening temperature, so up to approximately 50% of the resin may leak out of the winding. Finally, the resin hardens at 150°C to a cross-linked and therefore hard material, which primarily improves the insulation and increases the hardness of the winding but also protects it from environmental stress.

Initially, the VPI – Technology was developed to impregnate high voltage machines. Now, it is used for low voltage stators also, without any modification. Because of several technological reasons the quality of impregnation is not fully satisfactory for random wound windings, nevertheless it is used worldwide. Unlike in the application of VPI for high voltage purposes, the pressure cycle (From 2 bar to 4 bar.) is not necessary for low voltage random wound stators. Nevertheless, many companies apply pressure during impregnation. On the other hand there are impregnation facilities, which perform impregnation without vacuum using the dripping technology partly combined with heating the windings by current. The stators reach their end hardness after tempering in a convection oven.

### Contents and Targets

The goal of this project is to examine the applicability of a new, groundbreaking, efficient and ecological technology for its use in impregnating big random wound stators and to work out solutions for technical problems.

A new procedure of impregnating wind power stators using the joule effect (in German “Strom – UV – Verfahren”) has to be investigated. Technical problems have to be tackled in order to design for a suitable impregnation facility.

An advantage of heating stators by current supply is the high efficiency of 97% as opposed to approximately 40% efficiency of a typical forced-air oven. Energy consumption is reduced by 70%. A reduction of emission of at least 70% is feasible.

This is due to the fact, that that gelling temperature can be reached very quickly. Therefore, the resin is gelling very fast and almost no fluid resin may drop out of the slots.

The advantages of this technology have to be verified and proven by investigations. The applicability of this technology for impregnating large wind power stators in round wire or form wound coil design will be verified by theoretical and practical tests.

The insulation of the individual strands of form wound coils consists of an easily damageable band of fine mica. Therefore it is necessary to make sure that the insulation is not harmed when using the new technology. An overstressing due to high temperatures or quick heating may cause delamination of the insulation material. These problems have to be solved in order to design for a suitable facility.

A very important point of this project is the close co-operation with market relevant target groups. The long standing partnership with the market leader *NEG MICON* is an enormous advantage. The company *VESTAS Windsystems A/S* (former Vestas), a producer of wind power plants, has consented to impregnating several wind power stators in the pilot plant at company *Thumm* using the new technology to gain data and experience.

As a secondary goal, applicability of this technology to high voltage machines was investigated. First tests were to show which technical problems had to be tackled and if further research was promising.

### **Applied Methods**

Some random wound low voltage stators were impregnated using the new technology and then compared to impregnation done with VPI. The company *Gottlob Thumm* runs a pilot plant equipped with a control unit and a transformer rated specially to be able to impregnate big stators, as for example wind power stators with a conductor cross section of more than 250 mm<sup>2</sup> and a power of 900kW.

The impregnated objects were submitted to a careful visual examination first and then thoroughly electrically analysed.

The most important examinations were the heating of generators when into operation (steady-state) and the behaviour when applying high voltage. (Dielectric examination)

Important theoretical findings have been by closely co-operating with the institute of electrical machines and drive engineering of the technical university of Graz, specialized in the studies of electrical forces for form wound coils. This work is fundamental for the designing an impregnation facility for the impregnation of form wound coils.

A lot of testing under constant stress of high temperatures was necessary to estimate the problems and the possible damage for the insulation system when impregnating. Furthermore, this test serves also as a life test. Some of these tests are still running.



Figure 1: Pilot plant of company Gottlob Thumm in Germany. A stator of a wind power generator is prepared for impregnation.

Moreover, countless coils have been tested. They were evaluated visually by cutting them into pieces (sectional view) and weighed in order to determine the resin intake. Some coils were also investigated electrically (breakdown test,  $\tan \delta$ ).

The impregnated wind power generators are operating without any problems.

## Results

### Temperature-rise runs of small generators

Method	Resin	Pt-100 Nr. 1 DE	Pt-100 Nr. 2 DE	Pt-100 Nr. 3 DE	Pt-100 Nr. 4 NDE	Pt-100 Nr. 5 NDE	Pt-100 Nr. 6 NDE	Pt-100 MW DE	Pt-100 MW NDE	Pt-100 □ MW	Pt-100 Nut	Average warming	room	hou- sing
current-UV	Dobeckan MF 8001 UV	99,7	102,5	99,1	101,5	102,6	100,6	100,4	101,6	101,0	87,5	55,6	23,1	37,6
Current-UV	Herberts E4011 UV	100,0	101,1	100,6	101,7	102,8	102,2	100,6	102,2	101,4	89,6	56,0	20,4	37,9
VPI	Dobeckan FT2015	101,0	101,0	101,0	106,0	108,0	105,0	101,0	106,3	103,7	91,0	58,0	23,0	38,5
Standard without vacuum	Herberts E4011/129	101,0	101,0	101,0	106,0	108,0	105,0	101,0	106,3	103,7	91,0	56,9	23,0	38,5

Table 2: Temperatures [ $^{\circ}\text{C}$ ] of the temperature-rise runs of machines rated 37kW. Pt-100 Nr.1-3: Temperature sensor in the end windings at the drive side; Pt-100 Nr.4-6: Temperature sensor in the end windings at the non-drive end; Nut-Pt-100: Temperature sensor 5 cm in the slot at the ground of the slot; further, average warming, ambient temperature and the temperature of the housing are recorded.

Smaller stators with an operating power of 37kW show, that the stators which have been impregnated using the new technology are cooler (About 3 K) than the others. Further it is important to note, that about the double amount of resin is kept held in the stator.

## Temperature-rise runs of wind power generators which an operating power of 1 MW

First, the results of the runs of wind power stators with a rated power of 1MW were controversial. It was not possible to prove that impregnated stators using the new technology have a better thermal conductivity and therefore stay cooler due to the slot being better filled with resin.

On closer examination it was found that other effects like the heating caused by current displacement, which depends on the number of single conductor strands in the slots, influence the temperature-rise runs more strongly.

As criterion for the current displacement the leakage reactance of the stator winding was used. This measurement yields a new value, the  $K_r$ -factor. The final average heating of an object correlates with the  $K_r$ -factor. However, based on the statistical data available it was not possible to find an algorithm. In the course of an exhaustive examination of the  $K_r$ -factor, other influences were determined, for example the material quality, burr height of the laminations, the way in which the strands are assembled in the slots and the rotor design.

### Dielectric measurements

Partial discharges start much later with the new technology (compare figure 2). This is due to the good resin filling. The rise of the partial discharge is smaller and takes place at higher values. The absolute values of the dissipation factor measurement ( $\tan \delta$ ) differ strongly, as can be seen in table 2. This is caused by comparing two different resins which differ in dielectric factor. Therefore, only the rise of the dissipation factor must be considered. It has to be clarified by testing high voltage coils, in what way different dielectric factors and therefore different  $\tan \delta$ -values influence the  $K_r$ -factor. As yet, there are hardly any investigations into this topic.

When measuring the dissipation factor, a late and low rise of the  $\tan \delta$  means that the machine is capable of working properly even if extremely overloaded and that there is no damage of the isolation system to be expected, which may shorten the life cycle. Especially wind generators are susceptible to overloads caused by gusts of wind, so a low rise of the  $\tan \delta$  is an important contribution to a long service life.

These findings are of major interest for converter-fed machines, since such machines are continuously under load, so partial discharges may shorten the life cycle significantly.

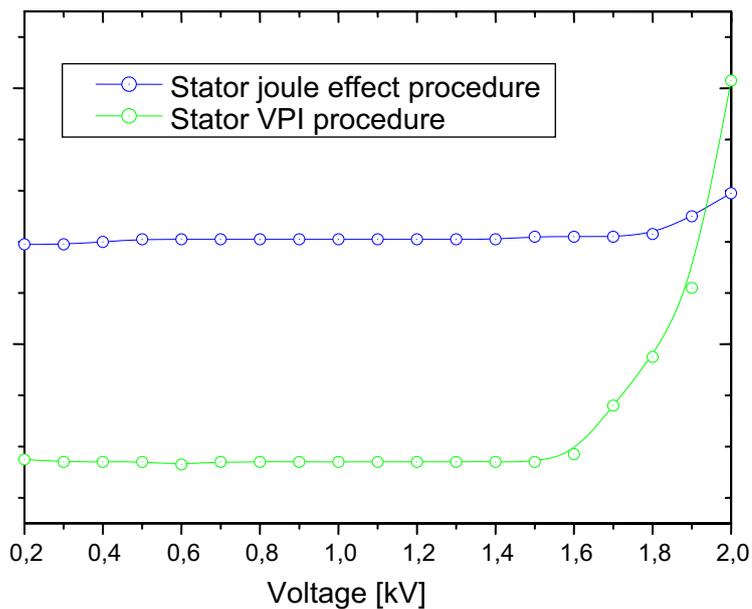


Figure 2:  
Dielectric measurement of two comparable windings, which were impregnated using two different methods. For the VPI process a polyester resin with vinyl toluene was used, for the joule effect procedure a polyester resin with acrylates was used.

### Further results

During the investigations of thermal stress endurance and partial discharge measurements two independent internal projects were started which are dealing intensively with this topic. Both projects are still running.

### **Conclusion**

Detailed theoretical and practical examinations have proven the applicability of this new technology for wind power stators, especially for wind power stators up to several megawatts completed in form wound coil design.

The advantages of this technology using the joule effect, which have been proved by extensive testing, are among others: a raise of energy efficiency, emission reduction to 1/10 of the emission caused by the VPI process and the better impregnation quality. The compatibility for future use is also certain.

Furthermore, fundamental research to adapt this technology to high voltage coils has been done, the results encourage continuing the investigations.

The main goal of the project at hand – the installation of a new impregnation facility - has been reached. Such a facility has been designed and will be installed in Weiz in the ELIN EBG Motoren GmbH in the course of the demonstration project “Factory of Tomorrow – 4<sup>th</sup> call”.

## 5 EINLEITUNG

### 5.1 Problembeschreibung

Das state-of-the-art Verfahren zur Tränkung von Statoren ist das VPI (Vacuum pressure impregnation) Verfahren.

Dabei wird ein zu tränkendes Objekt (z. B. Stator mit eingelegten Spulen) in einen Tränkkessel eingebaut und evakuiert. Wenn der vorgegebene Vakuum-Level erreicht ist, wird das Objekt mit Harz geflutet. Bei Objekten mit Hochspannungsspulen wird nun eine Druckphase eingeleitet um möglicherweise vorhandene Luftblasen zu komprimieren. Dies funktioniert jedoch nur wenn das Harz so eingestellt ist, dass es in der Spule zu gelieren (Einsatz der Härtung) beginnt. Dies ist auch deshalb nur bei Hochspannungsspulen möglich, da diese in der Hauptisolation einen Beschleuniger enthalten. Nach dem Brechen der Druckphase wird das Objekt aus dem Tränkkessel ausgebaut und in einem Ofen thermisch ausgehärtet. Diese für die Hochspannungstränkung entwickelte Tränktechnologie wurde für den Niederspannungsbereich modifiziert, wobei aus technologischen Gründen auf die Überdruckphase verzichtet wird. Bei Runddrahtwicklungen (Niederspannungswicklungen) ist zwischen den Drähten viel freier Platz, der in der Tauchphase zwar vollständig mit Harz gefüllt ist, das Harz bis zum Gelieren im Ofen jedoch nicht zurückgehalten werden kann. So laufen etwa 50 % des Harzes wieder aus der Wicklung aus, ein Großteil davon gelangt als Emission flüchtiger organischer Verbindungen in die Umwelt.

Auch ist das Hantieren mit frisch getränkten Objekten eine unangenehme Tätigkeit da abdampfende flüchtige Verbindungen leicht zu Reizungen der Atemwege und der Haut führen können und außerdem geruchsbelästigend sind.

Bei Niederspannungsmaschinen ist mit dem VPI-Verfahren keine absolut ausreichende Tränkqualität zu erreichen, dennoch findet es weltweit Anwendung, da es bis jetzt keine Alternativen gab.

In diesem Projekt wurde ein neues Verfahren, genannt Strom-UV-Verfahren auf seine Eignung für die Imprägnierung von elektrischen Wicklungen untersucht. Da es im Generatoren- und Motorenbau sehr unterschiedliche Wicklungs- und Isolationssysteme gibt wurde dieses Verfahren auf seine universelle Eignung im Niederspannungsbereich hin untersucht. Weiterführend sollte die Möglichkeit diese Technologie im Hochspannungsbereich einzusetzen einer Grundlagenbetrachtung unterzogen werden. Es ist beabsichtigt das VPI-Verfahren durch das neue Strom-UV-Verfahren zu ersetzen:

Statoren werden mittels Stromwärme in den Wicklungen (Gleichstromspeisung) und induktiv (Hochfrequenz) zuerst vorgewärmt, dann in das Harz getaucht und anschließend innerhalb kürzester Zeit und mit hohem Wirkungsgrad auf die Aushärtetemperatur gebracht. Kurz vor der Härtung dampfen zwar auch hier flüchtige Verbindungen ab, jedoch begrenzt sich dies auf ein sehr kurzes Zeitfenster. Durch Absaugung und anschließende Kondensation ist der Anteil von entweichenden flüchtigen organischen Verbindungen vernachlässigbar. Das ausgehärtete Harz selbst bildet ein dreidimensionales festes Netzwerk und ist für die Umwelt keine Belastung mehr.

Der Fortschritt bei den Tränkhärzen und die technische Vorarbeit eines Anlagenherstellers haben das Strom-UV-Verfahren erst ermöglicht. Praktische Versuche zu diesem Thema gab es bereits, allerdings sind die elektrischen und mechanischen Verhältnisse derart komplex, dass umfangreiche theoretische Untersuchungen an der TU Graz als Fundament für weitere Betrachtungen erforderlich waren. Aufgrund der Verschiedenartigkeit der Dimensionen und Wicklungssystemen, die nach dem neuen Verfahren gefertigt werden sollen, waren diese Untersuchungen ein wesentliches Standbein des Projekts.

Nun ist beabsichtigt diese Technologie, welche für kleine Objekte bereits eingesetzt wird, für große Objekte zu adaptieren. Weiters ist beabsichtigt dieses Verfahren auch für Niederspannungsmaschinen mit Flachdrahtspulen einzusetzen. Eine Grundlagenbetrachtung soll die prinzipielle Eignung dieser Technologie (mitunter mit Vakuumtechnologie kombiniert) für Hochspannungsmaschinen eruieren, zumindest für den Bereich bis 6 kV.

## 5.2 Allgemeine Einführung in die Thematik

Im Prinzip kann zwischen drei großen Klassen von Generatoren unterschieden werden. Siehe dazu die Übersichtstafeln auf Seiten 19 bis 21.

- 1) Generatoren mit Niederspannungsrunddrahtwicklung
- 2) Generatoren mit Niederspannungsformspulenwicklung
- 3) Generatoren mit Hochspannungswicklung

Generatoren mit Betriebsspannungen unter 1000 V werden als Niederspannungsgeneratoren bezeichnet. Es ist durchaus möglich dass in Sonderfällen für kurze Zeit auch größere Spannungen auftreten (z. B. Stillstandspannungen bis 3000 V bei Schleifringläuferrotoren), diese Umstände müssen bei der Isolationsauslegung berücksichtigt werden, sollen hier jedoch nicht weiter diskutiert werden, da sie den Umfang dieses Berichtes sprengen würden.

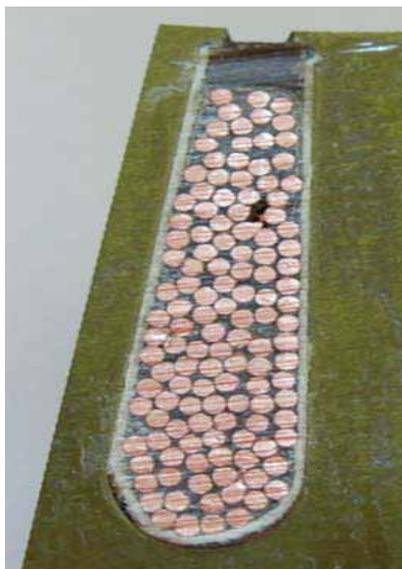
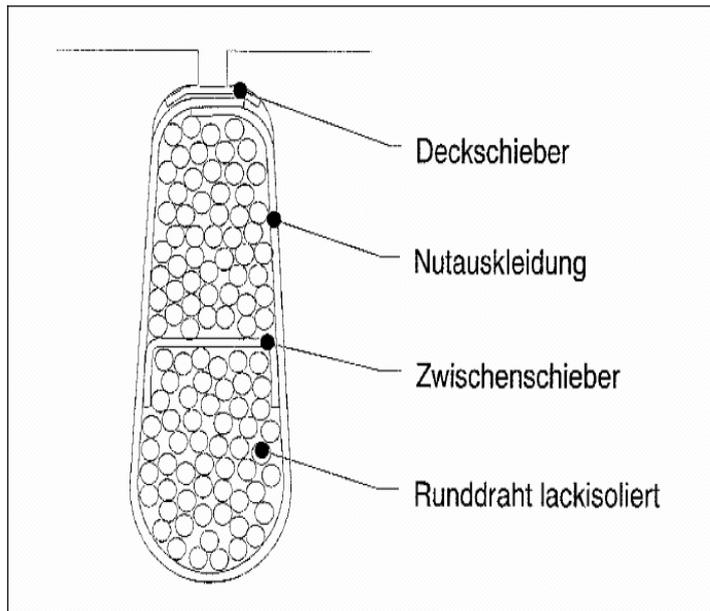
Im Bereich Wind- und Wasserkraft handelt es sich im Leistungsbereich der von der ELIN EBG Motoren GmbH abgedeckt vorwiegend um Niederspannungsgeneratoren.

Niederspannungsformspulenwicklungen werden dort eingesetzt wo möglichst viel Kupfer in die Nut gebracht werden soll (Verhältnis Kupfer – Eisen). Vergleiche Übersichtstafeln auf Seiten 19 und 20. Fertigungstechnisch sind Generatoren mit Runddrahtwicklungen günstiger zu fertigen, da diese maschinell in das Blechpaket eingezogen werden können. Formspulen müssen manuell eingelegt werden und erfordern ein höheres Maß an qualifizierten Mitarbeitern. Aus technischen und physikalischen Gründen ist für Niederspannungsgeneratoren ab einem Leistungsbereich von ein bis zwei Megawatt nur mehr der Einsatz von Formspulen sinnvoll.

Hochspannungsmaschinen und Generatoren sind von der Niederspannungstechnologie grundlegend verschieden. Das wichtigste Merkmal ist die Hauptisolation aus Glimmer, wobei die Dicke dieser Isolation sich nach der jeweiligen Spannungsanforderung richtet. Bei großen Spannungen treten physikalische Effekte auf, welche durch geeignete technische Maßnahmen berücksichtigt werden müssen, im Niederspannungsbereich jedoch vernachlässigt werden können.

Die folgenden Seiten sollen einen Überblick über den Aufbau der drei großen Klassen von Wicklungen für Generatoren in Form von Übersichtstafeln geben:

## System 1 : Niederspannungsrunddrahtwicklung

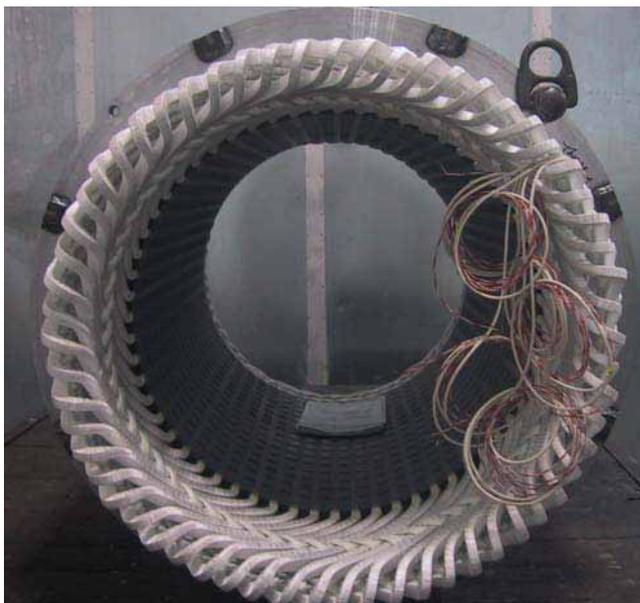
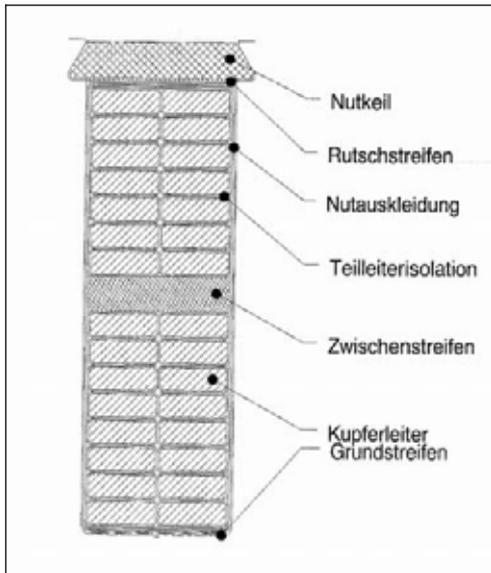


### Allgemeines:

Niederspannungsspulen werden mit isolierten Kupferdrähten mit Drahtdurchmessern bis 1,9 mm geformt (Bild links mitte). Die Drahtisolation besteht bei hochtemperaturfesten Wicklungen meist aus einer Polyamidimidlackschicht. Die Spulen werden entweder von Hand oder mit speziellen Einziehmaschinen in das Blechpaket eingelegt.

Gegen Eisen und gegen andere Phasen werden die einzelnen Drahtbündel mit hochtemperaturbeständigen Isolationsfolien, wie z.B. Aramidfolien, isoliert. Im Bild oben links ist der Aufbau der Niederspannungswicklung in der Nut schematisch dargestellt, darunter ist eine aufgesägte Nut einer bereits imprägnierten Maschine abgebildet. Gut zu sehen ist eine kleine Luftblase aber sonst eine recht vollständige Einbettung der Drähte in das Isolierharz.

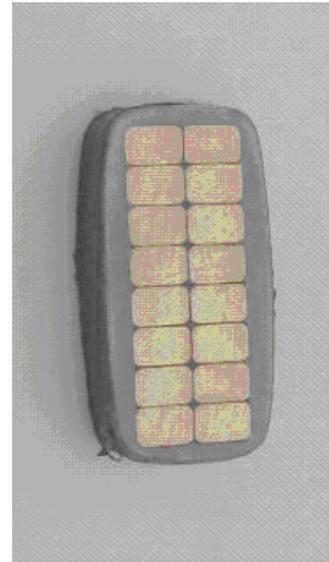
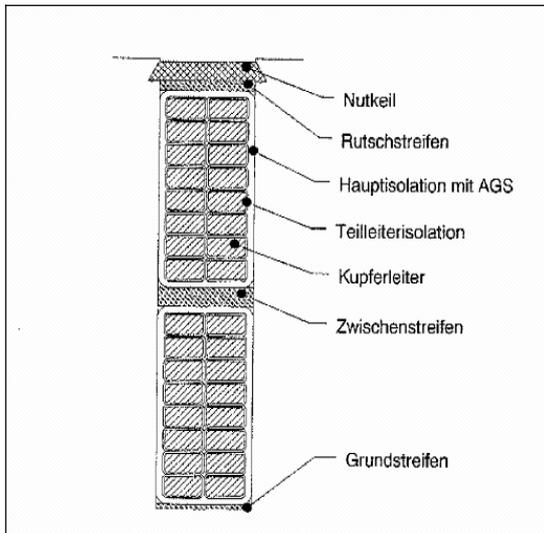
## System 2 : Niederspannungsformspulenwicklung



### Allgemeines:

Niederspannungsformspulen werden aus rechteckigem isoliertem Kupfer geformt. Der Vorteil ist die gute Stapelbarkeit des Kupfers wodurch mehr Kupfer in die Nut gebracht werden kann und dadurch das Verhältnis Kupfer zu Eisen erhöht wird. Außerdem lassen sich Stromverdrängungseffekte leichter beherrschen, d. h. geringere Verlustleistung und somit geringere Erwärmung. Bei Generatoren ab ca. 1 MW Leistung spielen Stromverdrängungseffekte eine so große Rolle, dass diese praktisch nur mit Formspulen ausgelegt werden. Der Aufbau der Wicklung ist im Bild oben links im Querschnitt gezeigt. Das Kupfer ist mit Feinglimmerfolien isoliert, die Verwendung von lackisoliertem Kupfer ist prinzipiell möglich aber aufgrund der extremen Steifigkeit sehr schwer zu verarbeiten.

## System 3 : Hochspannungswicklung



### Allgemeines:

Bei Hochspannungspulen ist die Spannungsdifferenz zwischen Kupfer und Eisen bzw. zwischen den Wicklungen untereinander nicht mehr mit einer Isolationsfolie als Nutauskleidung zu beherrschen. Hier ist aufgrund physikalischer Effekte, welche bei Niederspannung (<1000 V) nicht auftreten, ein komplexerer Aufbau nötig: Die (geformte) Spule wird mit einer Hauptisolation bestehend aus Feinglimmer versehen. Die Dicke richtet sich nach der Spannungsebene. Im Nutteil wird die Spule mit einer leitenden Folie (ca.  $1 \text{ k}\Omega$ ) versehen, um Feldkonzentrationen aufgrund des Schichtungsversatzes des Blechpaketes auszugleichen. Ab 8 kV müssen weitere Vorkehrungen zur Spannungsableitung getroffen werden (Endglimmschutz im Bereich des Nutausganges). Die fehlerfreie Tränkung mit Imprägnierharz spielt bei der Hochspannungsspule eine entscheidende Rolle.

## 5.2.1 Kurze Details zur Hochspannungsspule

Grundsätzliches zur Hochspannungsspule ist auf der Tafel auf Seite 21 beschrieben. Ab etwa 8 kV Betriebsspannung ist es notwendig die elektrische Potentialdifferenz aus dem Nutteil heraus zwischen dem Kupferleiter und dem Eisenpaket schrittweise zu senken, da ansonsten die Gefahr von unkontrollierten Entladungen besteht. Massive Konzentrationen des elektrischen Feldes treten vorwiegend am Nutausgang auf. Um das Potential vom Nutausgang weg in die Krümmung zum Wickelkopf hinaus zu verlagern, verwendet man ein halbleitendes Material auf Basis von Siliziumkarbid, auch Endenglimmschutz (EGS) genannt. Der Aufbau ist in Abbildung 3 zu sehen.

Es wird deshalb manchmal zwischen Mittelspannungsmaschinen und Hochspannungsmaschinen unterschieden, wobei die Grenze mit einer Spannung von 6,6 kV festgelegt wurde.

Die in dieser Forschungsarbeit geleisteten Voruntersuchungen bezüglich Eignung der Strom-UV-Technologie zur Tränkung von Hochspannungsspulen beziehen sich in erster Linie auf Mittelspannungsspulen (also 3 bis 6 kV), da die technischen Anforderungen bei größeren Spannungen unverhältnismäßig ansteigen. Auch wenn eine Anwendbarkeit dieser Technologie sich nur für Mittelspannungsspulen zeigt, würde dies trotzdem ein gewaltiges Einsparungspotential mit sich bringen.

Bei Hochspannungsgeneratoren ist es wichtig im Wickelkopf definierte Distanzierungen anzubringen welche gleichzeitig als Versteifungen wirken und für den nötigen Spannungsabstand sorgen.

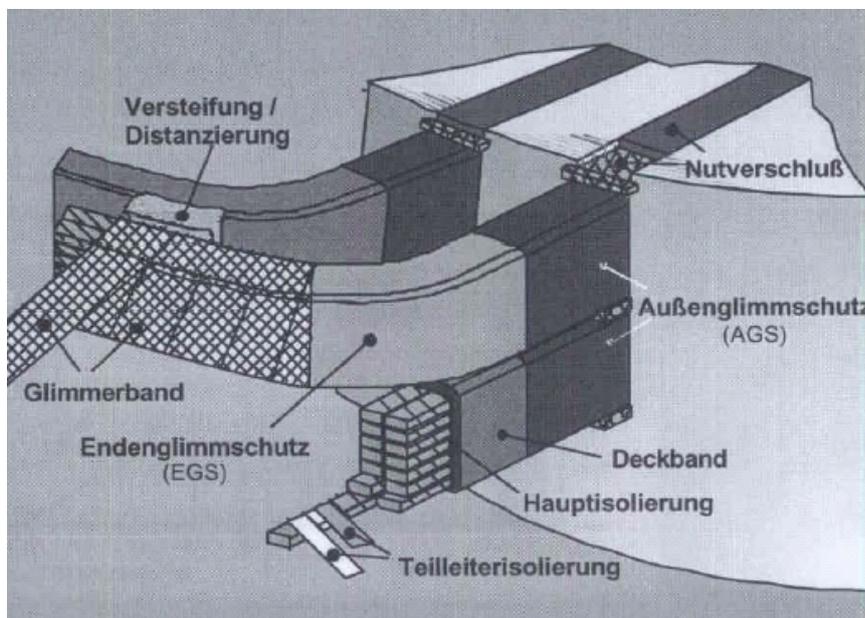


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Hochspannungsspule ab 6kV Betriebsspannung, genaue Beschreibung im Text.

## 5.3 Ziele des gegenständlichen Projektes

### 5.3.1 Allgemeines

Das gegenständliche Projekt zielt darauf ab die Strom-UV-Technologie auf die Eignung für den Einsatz zur Tränkung von großen Runddrahtgeneratoren sowie Formspulengeneratoren zu überprüfen bzw. Lösungen für technische Probleme zu erarbeiten. In einer speziell dafür umgebauten Versuchsanlage der Fa. *Gottlob Thumm GmbH* sollen große Windkraftstatoren getränkt werden und einer umfassenden elektrischen Prüfung unterzogen werden.

Aufgrund der Ergebnisse und Erfahrungen von Versuchen soll eine entsprechende Anlage dimensioniert und bei der Fa. *ELIN EBG Motoren GmbH* errichtet werden. Da eine derartige Anlage enorme Investitionskosten verursacht ist es vorrangiges Ziel dieses Forschungsprojektes eine Aussage darüber treffen zu können ob das gesamte Spektrum an Wind- und Wasserkraftgeneratoren mit dieser Anlage getränkt werden kann. Da bei Formspulen die Teilleiterisolation aus einer empfindlichen Feinglimmerisolation besteht, ist hier Augenmerk darauf zu legen, dass diese durch die Beanspruchung bei der Stromwärmetechnologie nicht Schaden nimmt. Denkbar wäre eine Delaminierung durch schnelles Aufwärmen bzw. punktuelle Temperaturüberlastungen.

Eine enge Zusammenarbeit mit marktrelevanten Zielgruppen ist ein sehr wichtiger Punkt des Projektes. In Bezug auf die Windenergie ist hier die langjährige Partnerschaft mit dem Marktführer Fa. *NEG MICON* von enormem Vorteil.

Der Windkraftanlagenhersteller *VESTAS Windsystems A/S* hat es ermöglicht mehrere Statoren bei der Fa. *Thumm* auf der Versuchstränkanlage im Strom-UV-Verfahren zu tränken.

Als zweitrangiges Ziel sollte untersucht werden ob das Strom-UV-Verfahren auch im Hochspannungsbereich eingesetzt werden könnte. Erste Versuche sollen zeigen, welche technischen Probleme im Hochspannungsbereich zu erwarten sind und ob weitergehende Forschung auf diesem Gebiet sinnvoll erscheint.

### 5.3.2 Technisch-wissenschaftliche Ziele

1) Tränkung von großen Statoren in Runddraht- und Flachdrahtausführung

→ Ziel: Überprüfen ob die neue Technologie für alle in Frage kommenden Konstruktionen geeignet ist.

2) Tränkung großer Statoren mit verschiedenen Harzen und ausführliche elektrische Untersuchungen an diesen Statoren.

→ Ziel: Auswahl des geeigneten Harzes für das Strom-UV-Verfahren.

3) Tränkung von Hochspannungsmaschinen mittels Stromwärmeverfahren

→ Ziel: Tränkung eines Prototyps

4) Planung und Errichtung einer Strom-UV-Anlage im Werk Weiz auf Grundlage der Ergebnisse der technischen Untersuchungen.

→ Ziel: Minimierte Emission, enorm verminderter Energieverbrauch, gesteigerte Wirtschaftlichkeit, gesteigerte Tränkqualität (Verbesserung der Umrichtertauglichkeit, Erhöhung der Lebensdauer der Maschinen), kontrollierte gleich bleibende Tränkqualität, größerer Durchsatz und Arbeitsschutz.

Im der Zusammenfassungsteil wird erneut auf die einzelnen Ziele und deren Status eingegangen.

### **5.3.3 Warum ist dieses Projekt im Rahmen der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ von Interesse?**

Werden Windkraft- und Wasserkraftstatoren in Zukunft über das im Projekt beschriebene Strom-UV-Tränkverfahren imprägniert, so ergeben sich enorme Einsparungen bezüglich des Energieverbrauches. Diese würden bei derzeitiger Auslastung bei der *ELIN EBG Motoren GmbH* im Bereich von 500.000 kWh pro Jahr liegen bzw. umgerechnet 70 % Einsparung bezüglich des derzeitigen Imprägnierprozesses ergeben. Noch viel dramatischer zeichnet sich der Vorteil des Strom-UV-Verfahrens bei Betrachtung der Emissionen ab: Eine Reduktion auf ein Zehntel des derzeitigen Wertes wird angestrebt.

Die Qualität der Imprägnierung beim Strom-UV-Verfahren ist dem herkömmlichen VPI-Verfahren weit überlegen, so dass sich dies auf die Lebensdauer der Statoren auswirkt. In weiterer Folge wird die gesteigerte Qualität der Produkte auch zu einem Imagegewinn führen.

Der weltweite Marktanteil der *ELIN EBG Motoren GmbH* an Windkraftgeneratoren liegt derzeit schon bei 15 % und soll weiter ausgebaut werden. Dies ist durch den Umstieg auf das innovative Strom-UV-Verfahren auf nachhaltige und umweltschonende Weise möglich. Das genannte Verfahren bietet große Zukunftskompatibilität, so dass eine Steigerung des weltweiten Marktanteiles auf ökoeffiziente, Ressourcenschonende Weise erfolgen kann.

Zusätzlich sei noch auf eine Quervernetzung zu den Zielen der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“ hingewiesen, da es sich bei den Produkten, deren Fertigung das gegenständliche Projekt betrifft, um Windkraft- und Wasserkraftgeneratoren handelt.

Die *Elin EBG Motoren GmbH* verwendet außerdem einen großen Teil des Forschungsbudgets für die energieeffiziente Auslegung, Konstruktion und Entwicklung zukunftsweisender Anlagenkomponenten im Bereich der erneuerbaren Energien, womit hier ein sehr wertvoller Beitrag zur zukünftigen Versorgungssicherheit bei gleichzeitiger Schonung der Ressourcen dieser Erde geleistet wird.

## 5.3.4 Technologie und Innovationen bei Produktionsprozessen

### 5.3.4.1 Beitrag zu den Gesamtzielen der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“

Energie ist die zentrale Triebkraft unserer Wirtschaft aber auch unseres Lebens. Es geht im gegenständlichen Projekt um die Entwicklung eines ökoeffizienten und nachhaltigen Produktionsprozesses, welcher derzeit umweltbelastend und sehr energieaufwändig ist, jedoch ein zentraler Fertigungsschritt des Herstellungsprozesses bei Windkraft- und Wasserkraftgeneratoren ist.

Das gegenständliche Projekt stellt auch eine Quervernetzung zum Impulsprogramm „Energiesysteme der Zukunft“ her, da es um die Fertigung von effizienten Energiesystemen der Zukunft geht. Forschungsarbeit, um diese Systeme effizienter zu machen, wird bei der *ELIN EBG Motoren GmbH* intensiv in Abstimmung mit den Windkraftanlagenherstellern \* betrieben, um konkurrenzfähig zu bleiben und das Produktprogramm noch näher an die 5 MW Grenze heranzuführen: dieser Leistungsbereich ist speziell für Offshore-Anlagen interessant, da die Windausbeute an den Küsten wesentlich größer ist.

Man darf Energiesysteme der Zukunft nicht losgelöst von der Herstellung dieser Komponenten betrachten. Es geht in diesem Projekt also auch darum die nötige Trendumkehr einzuleiten, nämlich den dramatischen Anstieg des Energieeinsatzes einzudämmen. Die Energieeffizienz eines bestimmten Herstellungsprozesses soll enorm gesteigert werden und so beispielhaft auch für das Leitprinzip des Partnerprojektes „Energiesysteme der Zukunft“ wirken.

Das gegenständliche Projekt richtet seine Ziele auf ökoeffizientes Wirtschaften durch die Erforschung und Entwicklung eines neuen technologischen Produktionsprozesses, welcher darauf ausgerichtet ist mit einem Minimum an Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung ein Maximum an Nutzen zu erzielen. Dies konnte im gegenständlichen Projekt vollständig erreicht werden und ist durch eine ausführliche Energieabschätzung und Emissionsbetrachtung (basierend auf Messungen von Imprägnierversuchen mit einer Versuchsanlage bei der Fa. *Gottlob Thumm GmbH*) im technischen Teil dieses Berichtes belegt.

Ein wichtiger Grundsatz der Programmlinie "Fabrik der Zukunft" ist die Umsetzbarkeit der Forschungsergebnisse zu Demonstrations- und Pilotprojekten im Bereich nachhaltiger Technologieentwicklung. Hier darf mit Stolz darauf hingewiesen werden, dass sich die *ELIN EBG Motoren GmbH* dafür entschieden hat einen Technologiesprung zu wagen und die Forschungsergebnisse des gegenständlichen Projektes umzusetzen. Es soll eine Anlage errichtet werden, welche nicht nur alle beschriebenen Vorteile umsetzen soll, sondern auch gewährleistet weitere Forschungen zu betreiben, um Möglichkeiten für weitere Einsatzgebiete zu eruieren.

Das gegenständliche Projekt geht konform in dem Energie als wesentlicher Bedarf von Morgen, Windkraftgeneratoren als Produkte für den Bedarf von Morgen (Off-Shore-Plattformen) gesehen werden können. Die Tränkarze dürfen in ihrer unverarbeiteten Form nicht als umweltfreundlich betrachtet werden, bei der Verarbeitung über das Strom-UV-Verfahren gelangt jedoch deutlich weniger (reduziert um 90%) organische Emission in die Umwelt (faktorielle Verbesserung). Weiters ist die Technologieentwicklung bei den Tränkarzen noch längst nicht abgeschlossen, so dass hier in naher Zukunft noch einmal ein gewaltiger Sprung erwar-

tet werden darf („Werkstoffe von Morgen“). Die geplante Strom-UV-Anlage ist für alle Harztypen geeignet, ein Harzwechsel kann mit geringem Aufwand durchgeführt werden, so dass die Zukunftskompatibilität der Anlage voll gewährleistet ist.

\*) Derzeit wird mit dem Marktführer *VESTAS Windsystems A/S* ein Projekt abgewickelt, wo es um die Entwicklung eines off-shore tauglichen 3 MW Generators geht.

#### 5.3.4.2 Beitrag zu den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung

##### Prinzip der Nutzenorientierung

Es geht in diesem Projekt um einen Fertigungsprozess zur Herstellung von Windkraftgeneratoren. Bei diesem Prozess sollen durch eine innovative Lösung Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung weitestgehend reduziert werden. Die mit diesem Prozess hergestellten Produkte, in erster Linie Windkraftgeneratoren sowie Wasserkraftgeneratoren, sorgen ihrerseits für eine Entlastung der Umwelt aufgrund effizienter und ökologisch sinnvoller Energiebereitstellung.

Es geht also bei der Bereitstellung der Produkte nicht primär um eine Versorgungsüberlegung (wo und wie viel kann verkauft werden), sondern um die Konzentration auf die mit den Produkten zu erfüllenden Funktionen.

Ein sehr wichtiger Punkt ist die Erhöhung der Lebensdauer der mit dem Strom-UV-Verfahren hergestellten Produkte aufgrund der besseren Sekundärisolation. Leider liegt es derzeit im Trend Preisvorteile stärker zu Bewerten als Lebensdauer und Qualität. Das Strom-UV-Verfahren soll jedoch beides vereinen, effiziente und daher kostengünstige Produktion bei gleichzeitiger Steigerung der Qualität und Lebensdauer.

##### Prinzip der Nutzung erneuerbarer Ressourcen

Dieses Prinzip ist im gegenständlichen Projekt hinsichtlich des Fertigungsprozesses nur so weit gegeben, als dass die Windenergie als erneuerbare Energie zum großen Teil die notwendige elektrische Energie zur Fertigung von Windkraftgeneratoren zur Verfügung stellen könnte. Der Anteil an Windenergie am elektrischen Strom ist derzeit natürlich noch nicht sehr hoch, ein forciertes Ausbauen der Windenergie (Off-Shore-Windparks) würde dieses Szenario der Erneuerbarkeit aber durchaus stärken.

##### Effizienzprinzip

Die Ressourceneffizienz liegt beim gegenständlichen Projekt hauptsächlich in der enormen Energieeinsparung (70%). Um diese Einsparung zu beziffern, soll erwähnt werden, dass in Bezug auf die derzeitige Auslastung bei Einführung der beabsichtigten Technologie in der ELIN EBG Motoren GmbH die Stromeinsparung bei ca. 500,000 kWh pro Jahr liegen wird. Zu einem geringeren Teil kann auch mit einer Einsparung an Tränkharz von etwa 10 % gerechnet werden. Dies ist ein geringer Anteil im Vergleich zur Stromeinsparung, wirkt sich aber auf lange Zeit gesehen deutlich aus.

Auch aufgrund der geringeren Prozesszeiten von bis zu einem zehntel der bisherigen Prozesszeiten kann die geplante Anlage sehr kosteneffizient arbeiten. Lediglich die hohen Anschaffungskosten stellen eine Hürde dar.

Das Effizienzprinzip kann also als das am Besten erfüllte Prinzip des gegenständlichen Projektes gelten.

#### Prinzip der Rezyklierungsfähigkeit

Lediglich die fertigen Produkte, nämlich Windgeneratoren (sowie Wasserkraftgeneratoren) welche hier aber nicht Thema sind, weil es um den Herstellungsprozess geht, nutzen erneuerbare Ressourcen.

#### Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionfähigkeit und Lernfähigkeit

Der Bezirk Weiz gilt als Naherholungsgebiet und ist besonders durch die „steirische Apfelstraße“ sehr bekannt. Die zahlreichen natur belassene Bereiche der Region dürfen durch industrielle Prozesse keinesfalls gefährdet werden.

Die geplante Anlage trägt zur ökologischen Entlastung der Region bei, was insofern sehr wichtig ist, da die Region Weiz auch Wirtschaftsgebiet ist und durch eine Vielzahl von angesiedelten industriellen Unternehmungen sehr vielen Menschen Arbeit bietet.

Der modulare Aufbau der geplanten Anlage ermöglicht die Umrüstung oder Erweiterung der Anlage an neue Gegebenheiten, daher bleibt diese auch zukunftscompatibel.

#### Prinzip der Fehlertoleranz

Es wird erwartet dass mit dieser Anlage eine Verfügbarkeit von über 95 % erreicht werden kann. Bei einem Störfall in der Anlage ist es sehr unwahrscheinlich dass die zu tränkenden Objekte unbrauchbar werden könnten, ebenso wenig kann es zu Unfällen durch Harz oder UV-Strahlung kommen, da die Anlage vollkommen gekapselt und mit einer automatischen Löschanlage versehen ist. Das Harz wird über Überlaufränder und Doppelmantelbehälter sofort nach Gebrauch rückgekühlt. Zur Revision und Inspektion wird die Anlage abgeschaltet.

#### Prinzip der Sicherung von Arbeit , Einkommen und Lebensqualität

Beim derzeitigen Imprägnierverfahren (VPI-Verfahren) müssen die zu tränkenden Objekte mit Kränen von Hand in Tränkkessel und Ofen eingebaut werden, dies geschieht in einer geruchsbelästigenden und gesundheitsgefährdenden Atmosphäre. Bei der geplanten Anlage brauchen die Statoren nur mehr kontaktiert zu werden (halbautomatisch über hydraulische Kontakte), der gesamte Imprägnierprozess läuft vollständig mikroprozessorgesteuert in einer hermetisch verriegelten Zelle ab. Das Personal wird diese Anlage über eine spezielle Bedienungssoftware steuern. Ein Servicetechniker mit elektrotechnischen Kenntnissen ist für die Wartung der Elektronik zuständig.

## 5.4 Marktbetrachtung Windkraft

Das Marktsegment Windkraftgeneratoren ist für unsere Firma das wichtigste Segment, mit dem Segment Wasserkraft zusammen wird ein derzeitiger Anteil von ca. 50% des Gesamtumsatzes erreicht. Für unsere Unternehmenspolitik ist es wichtig, diesen Anteil noch weiter zu erhöhen und auch den Kundenkreis zu erweitern.

Daher entwickelt die Forschungsabteilung unserer Firma hauptsächlich neue und leistungsfähigere Windkraftgeneratoren, wobei der Kontakt zum Kunden an oberster Stelle steht. Dadurch entstehen im Rahmen dieser Forschungen an den Kundenwunsch angepasste Maschinen mit einem großen Potential. Autonom wird intern Forschung betrieben und diese über das fertige Produkt verrechnet.

Mit jährlich mehr als 900 Stück produzierten Windgeneratoren ist ein Grundstein für die Entwicklung in Richtung Nachhaltigkeit gelegt worden.



Abbildung 4 : Schematischer Aufbau eines Windgenerators

Durch den Einsatz der neuen Technologie wird der Trend in Richtung umweltfreundlicher Energiegewinnung und Nachhaltigkeit auch auf die Produktion von Windkraftgeneratoren angewandt. Diese Vorteile werden aufgrund der geringen Preisspanne durch höhere Absatzmengen seitens des Kunden abgegolten, wobei es nötig ist, auf dieses Produkt durch erhöhte Bewusstseinsbildung und verstärktes Marketing aufmerksam zu machen.

Durch den vermehrten Einsatz von Windkraftanlagen in so genannten Offshore – Bereichen wird an die Langzeitstabilität der Maschinen hohe Anforderungen gestellt, verursacht durch den permanenten Salzeinfluss durch die Meeresluft und feine Sandpartikeln. Somit kommt der Qualität der Tränkung und somit der Versiegelung gegen diese Einflüsse eine noch größere Bedeutung zu. Die geforderte Lebensdauer beträgt, abgesehen von den Verschleißteilen etwa 20 Jahre.

Weitere Entwicklungen in diesem Sektor werden so genannte Aufwindkraftwerke darstellen, welche nicht mindere Anforderungen an das Isolationssystem und die Wicklung stellen werden. Bei dieser Art von Kraftwerk werden die Generatoren auf etwa 200m hohen Türmen in vorwiegend Wüstengebieten montiert sein, mit niedrigen Drehzahlen betrieben, und um die 5

MW Energie liefern. Diese luftgekühlten Generatoren müssen in einer höheren Temperaturklasse ausgelegt werden, da die Luft zum Kühlen schon um die 70°C warm ist und es somit zu Temperaturspitzen bis zu 200°C vor allem im Wickelkopf des Generators kommen kann. Diese Umstände werden sich natürlich auf die Lebensdauer der Maschine auswirken, wobei dem durch eine bessere Tränkqualität entgegengewirkt werden kann. Jedoch wird die Entwicklung derartiger Generatoren noch einige Jahre in Anspruch nehmen.

Ebenso kommt dem Sektor Wasserkraft neben der Windenergie eine große Bedeutung zu. Auch hier werden intensive Bemühungen eingesetzt, um den Ausbau in diesem Sektor weiter voranzutreiben, wie der folgende Überblick zeigt:

Direkt durch Kaplansturbinen angetriebene Asynchrongeneratoren für Kleinkraftwerke (ca. 250 – 400 kW) mit Oberflächenkühlung und ohne Getriebe. Derartige Anlagen sind robuster und zeigen weniger Verschleiß und verfügen über eine längere Lebensdauer da keine Ölschmierung für ein Getriebe benötigt wird.

Asynchrongeneratoren für unregelte Turbinen (360 kW, 690V). Der Vorteil dieser kleinen Generatoren ist, dass sie in vorhandene Bauwerke eingebaut werden können. Geregelt werden derartige Kraftwerke über die Anzahl der dazu geschalteten Generatoren. Dazu gab es im letzten Jahr die Entwicklung der so genannten „Matrix – Turbinen“, welche in fließenden Gewässern allein durch die Strömung Energie gewinnen. Von diesen Generatoren wurden 80 Stück produziert und in den Mittelmeerraum ausgeliefert.



Abbildung 5 : Matrix – Generatoren

In Entwicklung befindet sich derzeit auch ein permanent erregter Synchrongenerator, welcher Asynchrongeneratoren ersetzen soll. (Vorteil: kein Getriebe im Anwendungsfall Windkraftgeneratoren)

Auch die Ausnutzung der Gezeitenkraft soll in Zukunft saubere Energie liefern. Für diesen Zweck werden langsam drehende (25 rpm) Generatoren im 600-800 kW Bereich entwickelt.

## 5.4.1 Übersicht über den Windmarkt

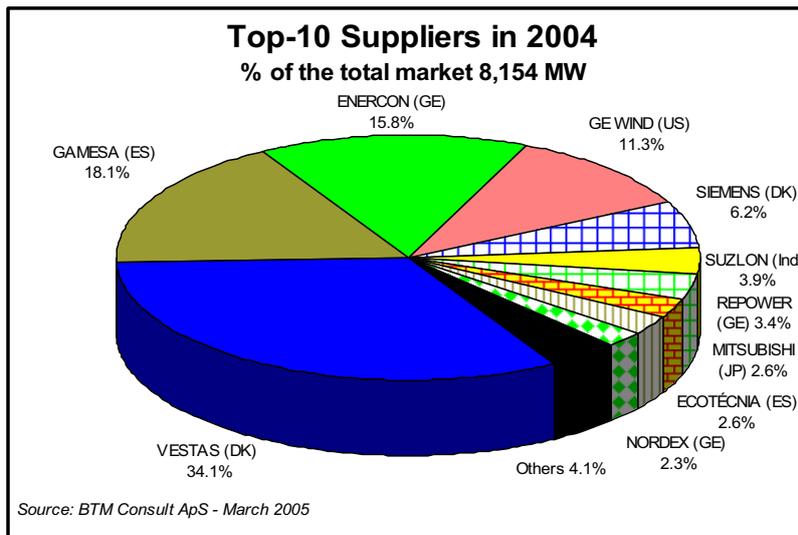


Abbildung 6 : Marktanteile der Hauptwettbewerber am Windkraftsektor

In Bezug auf den Weltmarkt liegt unser derzeitiger Marktanteil in der Windbranche im Leistungsbereich ab 750 kW bei etwa 15%.

Die folgenden Daten zeigen die Entwicklungen am Sektor für Windenergie in letzten Jahren und geben Auskunft über die zu erwartende Entwicklung der Windbranche

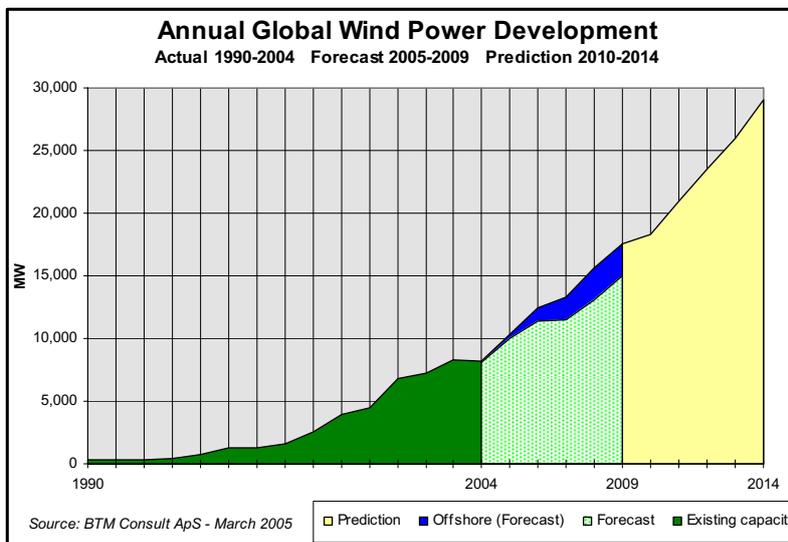


Abbildung 7 : Jährliche Entwicklung der Windkraft mit Aufschlüsselung der offshore – Parks

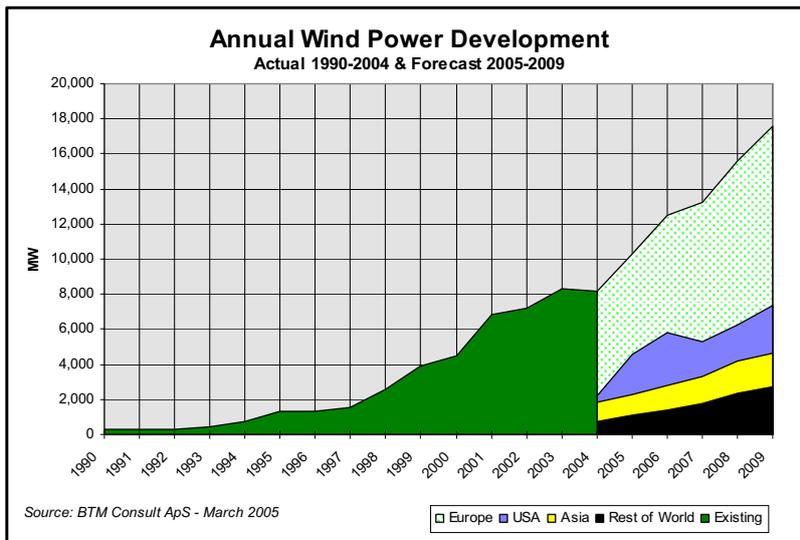


Abbildung 8 : Aufschlüsselung der Entwicklung am Windmarkt nach Kontinenten

	Accu. MW 2003	Installed MW 2004	Share 2004 %	Accu. MW 2004	Share accu. %
VESTAS (DK)	14,797	2,783	34.1%	17,580	36.7%
GAMESA (ES)	4,965	1,474	18.1%	6,438	13.4%
ENERCON (GE)	5,758	1,288	15.8%	7,045	14.7%
GE WIND (US)	4,428	918	11.3%	5,346	11.2%
SIEMENS (DK)	3,367	507	6.2%	3,874	8.1%
SUZLON (Ind)	463	322	3.9%	785	1.6%
REPOWER (GE)	893	276	3.4%	1,169	2.4%
MITSUBISHI (JP)	806	214	2.6%	1,019	2.1%
ECOTÉCNIA (ES)	531	214	2.6%	744	1.6%
NORDEX (GE)	2,219	186	2.3%	2,406	5.0%
Others	4,026	334	4.1%	4,359	9.1%
<b>Total</b>	<b>42,253</b>	<b>8,513</b>	<b>104%</b>	<b>50,766</b>	<b>106%</b>

Source: BTM Consult ApS - March 2005

Abbildung 9 : Übersicht der installierten MW der Hauptwettbewerber am Windsektor

Da die Entwicklung der letzten Jahre immer weiter in Richtung dezentraler Energiesysteme und Ressourcenschonender Energiepolitik geht, ist es für uns auch weiterhin von großer Bedeutung sich neben den Wettbewerbern am Markt zu etablieren.

Die Beteiligung an internationalen Ausschreibungen und die Errichtung von Windparks, vor allem in Deutschland war in den letzten Jahren ein wichtiger Bestandteil der geleisteten Arbeit.

Es sei noch einmal explizit darauf hingewiesen, dass die Fertigung von Windkraftgeneratoren für unsere Firma ein sehr wichtiges Standbein darstellt und wir alles daran setzen die Fertigung sowohl von Windkraftgeneratoren als auch von Wasserkraftgeneratoren weiter auszubauen. Dies ist aber nur durch umsichtige und vorausschauende Planung, sowie durch Einsetzen von moderner Technologie langfristig zu erreichen.

## 6 Harzvergleich und Harzauswahl

### 6.1 Allgemeines

Durch die beabsichtigte Einführung der Strom-UV Technologie ist es notwendig geworden sich einen aktuellen Überblick über die zur Tränkung in Betracht kommenden Harze zu verschaffen. Auf diesem Thema wird derzeit seitens der Harzfirmen wieder verstärktes Forschungsengagement gezeigt. In den letzten Jahren sind neue Harzsysteme auf den Markt gekommen, welche sich inzwischen als grundsätzlich geeignet erwiesen haben. Bei den meisten dieser neuen Systeme gibt es bereits die dritte bis vierte Generation. Dies zeigt einerseits, dass die Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist, d. h. eine Optimierung notwendig ist, da einige Parameter noch nicht ganz den Wünschen der Harzanwender entsprechen, andererseits beweist dies die Zukunftsfähigkeit dieser Harze, da sonst nicht so intensiv in die Weiterentwicklung investiert werden würde.

Ein weiterer Grund die Thematik der Harzwahl genauer zu betrachten ist der Grund, dass sich die in diesem Projekt untersuchte Strom-UV-Technologie bezüglich der Tränkparameter grundsätzlich von der bisherigen Tränktechnologie, dem VPI-Verfahren, unterscheidet.

Zum besseren Verständnis soll hier ein kurzer Überblick über die in Frage kommenden Harze gegeben werden.

### 6.2 Harzüberblick

Im groben gibt es 3 unterschiedliche Tränkharsysteme, welche im Motoren- und Generatorbau Verwendung finden. Dies sind ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze), Epoxidharze (EP-Harze) und Silikonharze.

#### UP-Harze:

Um eine entsprechende Temperaturbeständigkeit zu erreichen, werden Polyesterharze welche für den Verguss von hochtemperaturbeständigen elektrischen Wicklungen vorgesehen sind, mit Imidgruppen modifiziert. Da im Elektromotorenbau die Temperaturbeständigkeit ein sehr entscheidendes Kriterium ist, werden vorwiegend Imidgruppen modifizierte Polyesterharze verwendet. Die Bezeichnung UPI-Harze hat sich jedoch nicht richtig durchsetzen können, so dass diese Art von Harzen etwas schlampig als UP-Harze bezeichnet werden. Die Kenntnis dieses Umstandes kann für den unerfahrenen Anwender von Nutzen sein, da es durchaus vorkommen kann, dass für gewisse Anwendungen nicht modifizierte und weniger temperaturbeständige UP-Harze verwendet werden.

UP-Harze können auch aufgrund unterschiedlicher Copolymere, welche zum Einsatz kommen, unterschieden werden. Als Copolymere können Styrole, Acrylate, Phthallate oder oligomere bzw. höhermolekulare Verbindungen mit CC Doppelbindungen als reaktiven Gruppen eingesetzt werden.

Als styrolische Verbindungen kennt man hauptsächlich Styrol oder Vinyltoluol, wobei das teurere Vinyltoluol einige Vorteile gegenüber dem Styrol bietet. Es ist vor allem weniger toxisch und weniger flüchtig, so dass durch Verdunstung im Fertigungsprozess weniger in die Umwelt gelangen kann.

Als acrylische Verbindungen finden vor allem Butandioldiacrylat, Hexandioldiacrylat und Dipropylenglycoldiacrylat Verwendung. Acrylate zeigen eine größere Neigung zur Homopolymerisation als zur Copolymerisation. Dieser Umstand kann bei ungünstigen Harzformulierungen zu weniger flexiblen bzw. spröden Harzen führen.

Als Phthallat welches als Copolymer für UP-Harze in Frage kommt, ist eigentlich nur das Diallylphthalat (DAP) bekannt. DAP zeigt eine weit geringere Neigung zur Polymerisation als die vorher beschriebenen Verbindungen, so dass es vorkommt, dass ein Teil des DAP's wie ein Weichmacher indifferent im polymeren Netzwerk vorliegt, welches während der thermischen Alterung ständig entweicht. Auch die Eigenschaften des Formstoffes werden sich dadurch mit der Zeit verändern.

Einen ganz anderen Weg kann man auch gehen, wenn man anstatt oben beschriebener monomerer Verbindungen oligomere oder hochmolekulare Verbindungen verwendet, welche CC Doppelbindungen enthalten, welche reaktiv genug sind, um bei der Polymerisation zum gewünschten Formstoff zu gelangen. Die Schwierigkeit hierin liegt in der hohen Viskosität derartiger Systeme, welche im großen Molekulargewicht dieser Verbindungen begründet liegt. Die Reaktivität derartiger Systeme ließ bei den ersten Harzformulierungen zu wünschen übrig. Inzwischen ist eines dieser Systeme) bereits so weit entwickelt, dass sowohl Reaktivität als auch Viskosität in einem sehr günstigen Bereich liegen (Dobeckan MF 8004 UV).

#### EP-Harze:

Epoxidharze sind Zweikomponentensysteme. Die Beiden Komponenten eines Epoxidharzsystemes werden als Harz und Härter bezeichnet. Diese Nomenklatur führt des Öfteren zur Verwechslung, es ist nicht immer klar ob mit der Bezeichnung Harz nur die „Harz-Komponente“ oder das „Reaktivharzsystem EP-Harz“ gemeint ist. Die „Harz-Komponente“ ist zumeist ein Bisphenol mit einer Epoxidgruppe. Der Härter besteht zumeist aus einem Anhydrid. Getrennt sind beide Komponenten sehr lange lagerfähig. Das gemischte System hat eine begrenzte Lagerzeit (potlife), welche von Faktoren wie Beschleunigerzusatz, Verunreinigung, Harzverbrauch und Neuharzzusatz beeinflusst wird. Damit Epoxidharze eine entsprechende Endhärte erreichen können müssen diese mittels eines Beschleunigers ausgehärtet werden. Als Beschleuniger für Epoxidharze werden vorwiegend Zinknaphthenat, Bortrichlorid und tertiäre Amine verwendet.

#### Silikonharze:

Imprägnierharze auf Silikonbasis für die VPI-Imprägnierung von Wicklungen elektrischer Geräte bestehen in der Regel aus Methylphenylpolysiloxan, welches nicht mit organischen Komponenten modifiziert ist. Die Aushärtung erfolgt durch platinkatalysierte Additionsvernetzung in der Wärme. Silikonverbindungen sind für deren extreme Temperaturbeständigkeit bekannt. Allerdings ist die mechanische Eigenschaft dieses Harzes eher als unterdurchschnittlich zu bezeichnen, so dass bei Verwendung eines derartigen Harzes darauf Rücksicht genommen werden muss. Vor allem die Empfindlichkeit gegenüber Wasser ist zu beachten.

### 6.3 Technischer Vergleich der Harze und Einsatzgebiet

#### Niederspannungswicklungen, Runddraht:

Für Niederspannungsstatoren, welche mit Runddraht gefertigt kommen nur UP-Harz und Silikonharz in Frage, Epoxidharze dürfen insbesondere bei großen Objekten nicht verwendet werden. Der Grund hierfür liegt darin, dass das Epoxidharz eine sehr starke Bindung zur Oberfläche der Lackisolation der Runddrähte eingeht. Bei großen Objekten ist mit einem erheblichen Wärmespiel zu rechnen. Diese Wärmedehnungseffekte können zu Sprüngen in der Harzmatrix führen, wobei auch spontane Ausbildungen von Sprüngen durch innere Spannungen möglich sind. Bildet sich ein Riss in der Harzmatrix und geht dieser bis zur Lackoberfläche des Lackdrahtes, so setzt sich der Riss aufgrund der stark kovalenten Bindung des Harzes an der Lackoberfläche bis zur blanken Oberfläche des Kupfers fort. Dieser „Isolationsfehler“ führt früher oder später unweigerlich zum Ausfall der Maschine/Generator.

#### Niederspannungswicklungen, Formspule:

Bezüglich Formspule gibt es derzeit keine Beschränkungen bezüglich der Art des Tränkharzes. Es gibt vergleichende Untersuchungen über den Einsatz sowohl von UP-Harz als auch EP-Harz. Der Einsatz von Silikonharz ist ebenfalls möglich.

#### Hochspannungswicklungen, Formspule:

Hochspannungswicklungen werden generell mit EP-Harz Systemen getränkt. Wobei es vereinzelt Literatur über die Möglichkeit der Verwendung von UP-Harz Systemen gibt. Auch im gegenständlichen Projekt wurden Tränkversuche mit UP-Harze durchgeführt.

Je nach Spannungsbereich der Hochspannungswicklung sind unterschiedlich strenge Kriterien zu erfüllen, so dass dieses Thema differenziert betrachtet werden muss. In erster Linie soll nur die Spannungsklasse von 3 bis einschließlich 6,6 kV betrachtet werden.

Der Grund wieso in der Hochspannungstechnologie derzeit noch ausschließlich EP-Harz Systeme zum Einsatz kommen ist in der derzeit zur Anwendung kommenden Tränktechnologie zu suchen (VPI-Verfahren). Die Isolationsbänder der Hochspannungsspulen enthalten einen für das Epoxidharz geeigneten Beschleuniger. Wenn die evakuierten Spulen mit vorgewärmten (meist ca. 60°C) Epoxidharz geflutet werden und dieses in die Isolation der Spulen eindringt, kommt es mit dem Beschleuniger in Berührung und fängt an zu gelieren. Dies hat zwei Vorteile. Erstens beginnt das Harz genau dort zu gelieren wo es gebraucht wird, zweitens bleibt das überschüssige Harz, welches nach dem Tränkvorgang wieder zurückgesaugt wird ohne Beschleuniger, so dass die Lebensdauer (potlife) des Tränkharzes möglichst wenig beeinflusst wird. Ein ganz kleiner Teil an Beschleuniger wird natürlich in das Vorratsharz ausgeschwemmt, und beschleunigt dadurch dessen Alterung. Im Allgemeinen muss das Tränkharz zumindest in Intervallen von 3 Jahren völlig erneuert werden. Dies sind bei einigen Tonnen Vorratsharz enorme Kosten, so dass danach getrachtet wird diese Intervalle möglichst kurz zu halten.

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über allgemeine Eigenschaften von Tränkharz-Typen, welche für Wicklungs Imprägnierung Verwendung finden:

	Polyesterimidharz	Epoxidharz	Silikonharz
Temperaturindex (im allg.)	180 - 200	180	220
Peak-Temperatur	280	240	260
Mechanische Eigenschaften	gut	sehr gut	schlecht
Elastizität	gut	gut	sehr gut
Chemikalienbeständigkeit	gut	sehr gut	mäßig
Spannungsfestigkeit (bis)	15.8 kV	25 kV	6.6 kV

Tabelle 2: Vergleich der Eigenschaften verschiedener chemischer Familien von Harzen.

Wie bereits vorher erwähnt, gibt es für jedes Imprägnierharz einen typischen Anwendungsbereich (EP-Harze als typische Hochspannungsimprägnierharze und UP-Harze als typische Imprägnierharze für Runddrahtwicklungen, für Traktionsmotoren wiederum werden fast ausschließlich Silikonharze verwendet). Aufgrund neuer konstruktiver Lösungen bei Generator- und Motorenwicklungen und neuer Imprägnier-Technologien, sowie neuer Harzentwicklungen beginnen die in den letzten Jahrzehnten so scharf gezogenen Grenzen zwischen den einzelnen Harztypen stark zu verschwimmen. Die Anwendung und Auswahl der Isolierharze muss heute von ganz neuen Perspektiven aus betrachtet werden. Deshalb gibt die folgende vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Imprägnierharzsysteme einen Überblick über die teils sehr unterschiedlichen Eigenschaften dieser Tränkmittel. Es wird schnell klar, dass dieses Thema sich auch deshalb verkompliziert, da jedes Harz seine Vor- und Nachteile besitzt, welche sich sehr stark unterscheiden. Man muss sich aber klar für bestimmte Vorteile entscheiden und sich dabei im klaren sein bestimmte Nachteile in Kauf nehmen zu müssen, oder zusammenfassend gesagt: Es gibt bei den Tränkmitteln keine *eierlegende Wollmilchsau* sondern nur Tränkharze, welche untereinander streng differenzierte Eigenschaften aufweisen und zwar sowohl bezüglich der Eigenschaften des Ausgangsstoffes im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit als auch bezüglich des gebildeten Formstoffes, welcher die Langzeiteigenschaften der Wicklung beeinflusst.

## 6.4 Schrumpfungsverhalten

Wenn eine elektrische Wicklung in ein Tränkharz getaucht wird, so wird je nach angewandter Technologie mehr oder weniger Harz die Wicklung durchtränken und bis zur Gelierung durch eine Temperaturerhöhung (Ofen oder Stromwärmung) teilweise von der Wicklung wieder abtropfen. Es wird danach getrachtet die Wicklung möglichst vollständig mit Harz als Isolierstoff zu füllen. Jedoch je dicker Harzschichten sind desto größer wird auch ein möglicher negativer Einfluss durch ein ungünstiges Schrumpfungsverhalten beim Aushärtvorgang. Es ist daher günstig, wenn das Harz eine möglichst geringe Schrumpfung zeigt, da ansonsten dicke Schichten dazu neigen Risse und Brüche zu zeigen, welche die Isolationswirkung natürlich drastische herabsetzen.

Um die Auswirkung der Schrumpfung zu verdeutlichen wurde ein Polymer bei der Härtung einer so extremen Temperatur ausgesetzt, so dass es unweigerlich zur Rissbildung kommen musste. Man kann deutlich sehen wie stark sich das Polymer zusammenzieht und welche enormen Kräfte sich entfalten, deshalb ist die Temperaturführung beim Gelier- und Härteprozess so wichtig. In der Elektronik ist man bestrebt bei derartigen Anwendungen selbst Haarrisse zu vermeiden.

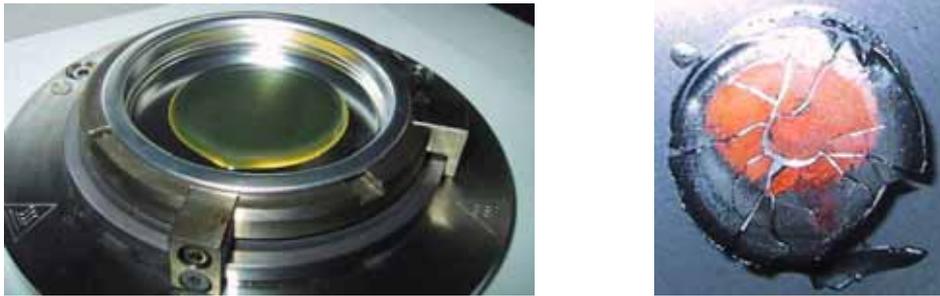


Abbildung 10 : Rissbildung durch Schrumpfung und Aushärtung bei extrem hoher Temperatur (250°C)



Abbildung 11: Ein in dicker Schicht ausgehärtetes Polymer welches ein ungünstigen Schrumpfungsverhalten zeigt kann zu Spannungsbrüchen neigen (links: optimal ausgehärtetes Harz, mitte: mehrere Makrorisse über das ausgehärtete Material verteilt, rechts: ein großer Spannungsbruch)

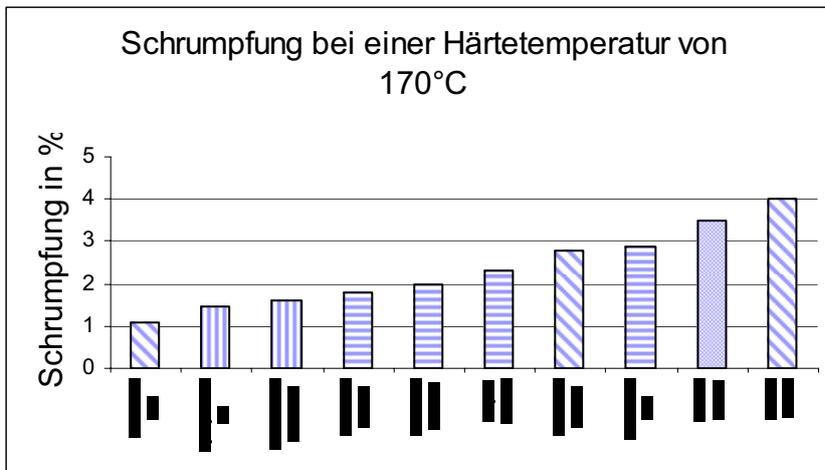
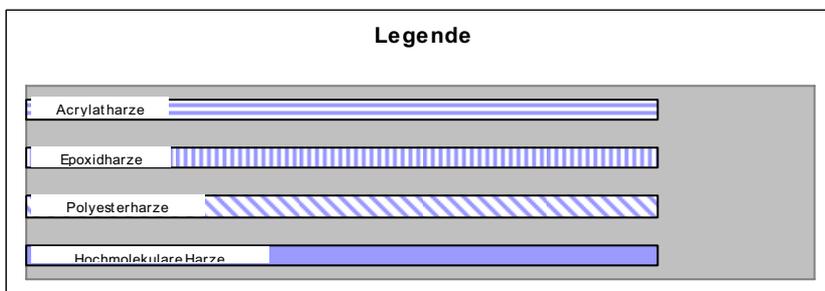


Abbildung 12: Schrumpfung von Probekörpern (Länge 40mm, Dicke 2mm) bei einer Aushärtetemperatur von 170°C. Dobeckan FT2015 (UP-Harz) zeigt den geringsten Schrumpf neben den Epoxid- und Acrylatharzen



## 6.5 Statische 3-Punkt-Biegeprüfung

Die Bruchdehnung von weichen Duromeren ist im Allgemeinen zwar größer als die von sehr harten und spröden Materialien, dafür ist die Bruchbelastung zumeist geringer. Das Acrylatharz Herberts E 4011 UV hat zwar einen viel geringeren Speichermodul als das VT-Harz Dobeckan FT 2015, trotzdem ist es um einiges spröder, es bricht bei viel geringerer Belastung bei einer vergleichbaren Bruchdehnung. Das Harz Dolphon XL 2102 weist keine Bruchdehnung auf, es ist extrem weich, allerdings ist auch die maximale Festigkeit ( $R_m$ ) dieses Harzes sehr gering.

Probe	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\square$ Bruch [%]	Bruch (Ja/Nein)
Dobeckan MF8001	1136 ± 60	35,6 ± 10	7 ± 1	Ja
Herberts E4011/129	1351 ± 60	44,2 ± 2	4,2 ± 1	Ja
Herberts E4011UV	1453 ± 56	39 ± 5	3 ± 0,5	Ja
Dolphon XL2102	100 ± 6	8,6 ± 0,4	-	Nein
Dobeckan FT2015	4092 ± 105	103 ± 6,7	2,3 ± 0,3	Ja
EpoxyLite H1004	2754 ± 79	94,1 ± 1,5	11 ± 1	Ja, bei 66% der Proben

Tabelle 3: E-Modul, maximale Festigkeit  $R_m$  und Dehnung  $\square$  bei Bruch der Probe, gemessen mittels statischer 3-Punkt-Biegeprüfung mit einer Prüfungsgeschwindigkeit von 1 mm/min und einer Stützweite von 45 mm. Die gehärteten Proben hatten eine Geometrie von  $D \times B = 3 \times 5$  mm

## 6.6 Glasübergangspunkt

Der Glasübergangspunkt zeigt sich in der dynamisch mechanischen Analyse durch die Abnahme des Speichermoduls bei gleichzeitigem Anstieg des Verlustmoduls und des  $\tan \delta$ . Weil die Reaktionsharze vernetzt sind haben sie keinen Schmelzpunkt sondern verhalten sich wie ein amorpher Stoff. Außerdem geht bei vernetzten Polymeren der Speichermodul nicht gegen Null sondern bleibt auf einem Plateauwert so dass das Polymer auch 50 bis 76°C über dem  $T_g$  noch tragende Eigenschaften besitzt. Es ist teilweise sehr schwierig den Glasübergangspunkt eines vernetzten Tränklarz-Formstoffes zu bestimmen, da derartige Harze oft sehr komplexe Zusammensetzungen haben, welche dem Formstoff die Eigenschaften eines Mischpolymers verleihen.

In folgender Tabelle sind von unterschiedlichen Laboratorien gemessene Glasübergangspunkte angegeben:

Harz	DSC (TU-Wien)	DMA (TU-Graz)	DMA (TU-Wien)
Herberts E 4011/129	59	60	7.5
Herberts E 4011 UV	54; 60; 70	78	5
Dobeckan FT 2015/60 EK	120	137	84
Dobeckan MF8001 NV	55; 63	60	-5
Dolphon XL2102	50	115	-16

Tabelle 4: Glasübergangspunkte  $T_g$  verschiedener Polyesterimidharze in °C, gemessen an verschiedenen Messgeräten. Die DMA-Untersuchungen auf der TU-Wien wurden mit anderen Probengeometrien durchgeführt. Als auf der TU-Graz

Bei manchen Harzen scheinen die erhaltenen Werte aus unterschiedlichen Methoden etwas widersprüchlich, aber wie bereits erwähnt mag dies mit dem komplexen Aufbau und der Vernetzung des Polymeren Werkstoffes zu tun haben. Auch Experten auf dem Gebiet der Polymercharakterisierung sind sich über die Ursachen der divergierenden Messergebnisse nicht einig. So starke Abweichungen wie in obiger Tabelle sind bisher in der Literatur nicht bekannt. Doch ist zu bemerken, dass in der Forschung hauptsächlich mit gut definierten Modellverbindungen und nicht mit „realen“ komplexen Mischungen gearbeitet wird.

## 6.7 Thermisch mechanische Analyse (TMA)

Jedes Duromer hat bestimmte Temperaturbereiche, wo sich der Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$  ändert, in folgender Tabelle sind die jeweiligen Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  für den jeweils gültigen Temperaturbereich aufgetragen. Die Proben wurden bis maximal 180°C vermessen.

Harz	Bereich [°C]	$\alpha$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Bereich [°C]	$\alpha$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Bereich [°C]	$\alpha$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
J1	20-76	75	76-110	104	110-180	165
H1	5-40	70	50-180	140		
H1 nachgehärtet			50-180	166		
H5			50-180	146		
C1	50-110	78	115-180	182		
E1	50-110	108	120-180	149		

Tabelle 5: Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  für den jeweils gültigen Temperaturbereich der Probe gemessen mittels TMA. Im Vergleich:  $\alpha(\text{Kupfer}) = 18 \mu\text{m}/\text{mK}$ ,  $\alpha(\text{Eisen}) = 12 \mu\text{m}/\text{mK}$ .

Der Aushärtegrad der Proben beeinflusst die Größe des Wärmeausdehnungskoeffizienten nur um einige Prozent.

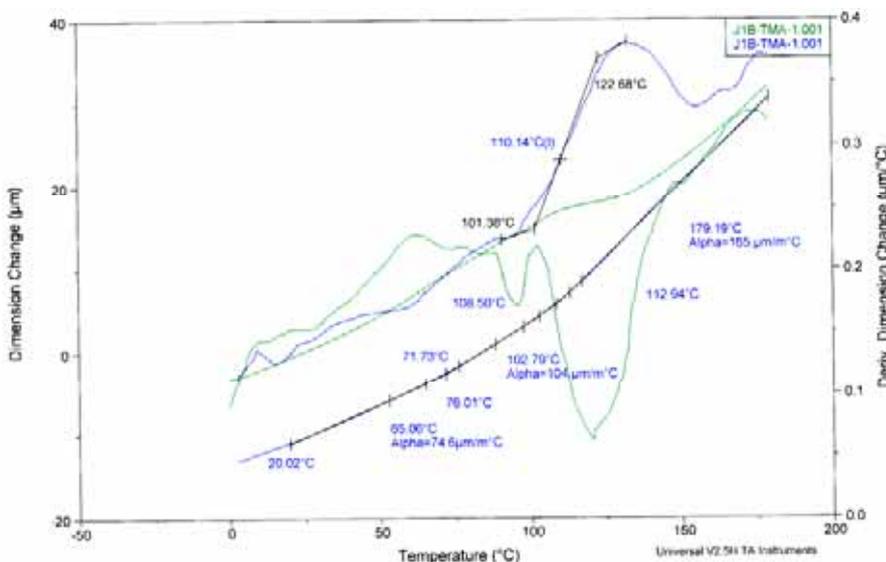


Abbildung 13: TMA Plot des Harzes Do-beckan FT 2015 (J1). Zu erkennen sind die drei linearen Bereiche der Wärmeausdehnung. Bei den meisten anderen Duromeren sind in diesem Temperaturbereich nur zwei lineare Bereiche zu erkennen

### 6.7.1 Temperaturbeständigkeit

Die Temperaturbeständigkeit ist eines der wichtigsten Kriterien von Isolierstoffen, insbesondere des Imprägnierharzes, da es entscheidend zur Temperaturbeständigkeit beiträgt. Allerdings ist die Bestimmung der Temperaturbeständigkeit, charakterisiert durch den Temperaturindex (TI-Wert) ein recht komplexes Thema. Obwohl für die Bestimmung der Temperaturbeständigkeit im Elektromotorenbau eine europäische Norm existiert (EN 60216) ist eine Beurteilung von einzelnen Materialien außerhalb der typischerweise angewandten Methoden schwierig. Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten für die Beurteilung des TI-Wertes. Allerdings führen unterschiedliche Bestimmungsmethoden oft zu erheblich voneinander abweichenden Werten. Im günstigsten Fall sollten sich die Messergebnisse einander ergänzen, das ist jedoch selten der Fall. Deshalb muss bei allen TI-Werten die Messmethodik mit angegeben werden. Am häufigsten wird die Beurteilung des Gewichtsverlustes herangezogen, da dies typisch für Zersetzungsreaktionen ist. Für ein komplexes System ist die Abschätzung der Dauertemperaturfestigkeit aufgrund der Beurteilung des Gewichtsverlustes unzureichend. Die Methode ist nur geeignet um erste Anhaltspunkte zu liefern. Trotzdem kann vielfach beobachtet werden, dass umfangreichere Untersuchungen als zu aufwändig erscheinen und daher nur die Beurteilung des Gewichtsverlustes als Kriterium herangezogen wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Harze der Dobeckan Serie allgemein bei niedrigeren Temperaturen einen höheren Gewichtsverlust aufweisen als Herberts Harze.

### 6.8 Viskosität

Die Viskosität von Tränklarzen ist für die Auslegung der technischen Ausrüstung und die Durchtränkbarkeit der Isolation der Wicklung entscheidend. Niedrige Viskositäten sind daher immer von Vorteil. Allerdings sind auch höherviskose Harze einsetzbar, wenn diese auf größere Temperaturen gebracht werden dürfen um eine entsprechende Tränkviskosität zu erreichen. Dies ist insbesondere beim monomerfreien Harz Dobeckan MF 8004 UV der Fall, hier muss das Harz sogar erwärmt werden. Wobei in der Strom-UV-Technologie nicht das Harz direkt erwärmt wird, sondern das zu tränkende Objekt, welches nur das angrenzende Harz erwärmt, welches in der Viskosität so stark erniedrigt wird, dass es leicht in die erwärmte Wicklung eindringen kann.

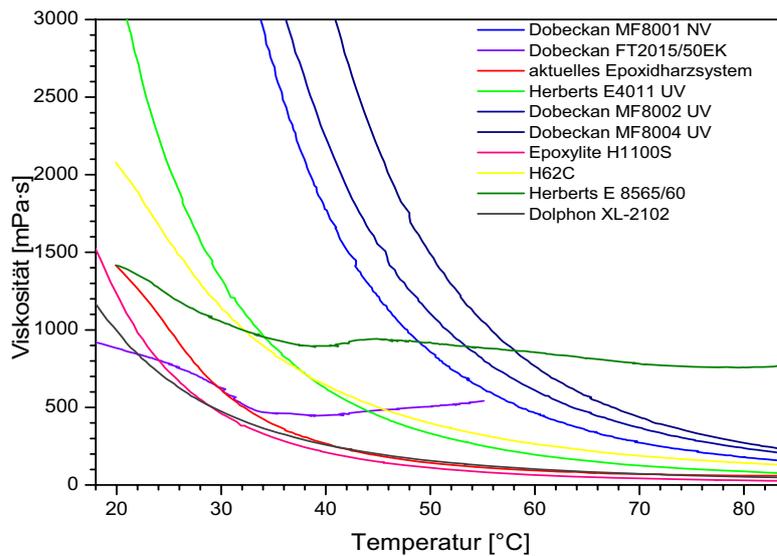


Abbildung 14 :  
Verlauf der Viskosität verschiedener UP-Harze in Abhängigkeit von der Temperatur

In der Abbildung 14 ist zu erkennen dass Epoxidharzsysteme eine sehr niedrige Viskosität zeigen, wobei beschleunigte Einkomponentensysteme etwas viskoser sind.

UP-Harz Systeme mit Styrol oder Vinyltoluol als Reaktivverdünner (Anteil ca. 40%) zeigen das für diese Harze typische Verhalten einer irreversiblen Veränderung des Harzes, wenn dieses über 35°C erwärmt wird. Viskositätsanstieg durch eine beginnende Harzalterung und eine Viskositätserniedrigung aufgrund der Temperatur laufen gleichzeitig ab, bei sehr großen Temperaturen beherrscht die Viskositätsabnahme die Viskositätscharakteristik, allerdings überlagert durch einen Zeitabhängigen Viskositätsanstieg durch Harzalterung (Bildung von Oligomeren, Homopolymerisation) bis hin zu einer beginnenden Gelierung.

Acrylate enthaltende UP-Harze können je nach Formulierung sehr unterschiedliche Viskositäten besitzen.

Das *monomerfreie* UP-Harz (Dobeckan MF 8001) zeigt die größte Viskosität von allen Harzen und ist vergleichbar mit dünnflüssigem Bienenhonig. Die neueste Version dieses Harztyps (Dobeckan MF 8004 UV) ist jedoch deutlich weniger viskos.

Dieses Harz ist für die Anwendung in der herkömmlichen Tränktechnologie (Tauchen bei Raumtemperatur) weniger geeignet. Es ist jedoch aufgrund seiner Lagerstabilität und Geruchsneutralität für die Strom-UV-Technologie gut geeignet.

In nachfolgender Übersicht finden sich ausgewählte Harze.

Aufgrund einer Vorauswahl stehen 4 Harze einem ausführlichen Vergleich zur Verfügung. Dies sind folgende Harze:

Harzart	UP-Harz	UP-Harz „monomerfrei“	UP-Harz Acrylat	Epoxidharz	Silikonharz
Harzname	Dobeckan FT 2015	Dobeckan MF8004UV	Herberts E4011UV	Araldite MY 757	H62C
Chem. Zusammensetzung	Ungesättigtes Polyesterharz, imidgruppenhaltig mit Vinyltoluol als Reaktivverdünner			Bisphenol A und Anhydrid	Phenylmethylvinylhydrogensiloxan
Temperaturindex					
Glasübergang	137°C		78°C	135-150°C	
Viskosität bei 20/ 25/ 30°C	600/450/300	12000/9000/5600	3300/ 2000/ 1300	500/300/200	1400 (20°C)
Viskosität bei 80°C	100	190	90	20	20 (80°C)
Gelierzeit bei 100°C	50 – 70 min	-	10 - 15 min	400 min	
Gelierzeit bei 120°C	20 – 30 min	8 min	2 – 3 min	200 min	20 min (200°C)
Härtungsbedingungen	60 min bei 150°C	15 min 160°C plus UV	20 min bei 170°C	18h bei 140°C	
Schrumpfung in %	1,1%	3,5%	2%	1,5%	
Heizen im Harz	Nein	Erforderlich (wegen der hohen Viskosität, sonst schlechte Imprägnierqualität)	Möglich (wegen der günstigen Viskosität zumeist nicht erforderlich)	Noch keine Erfahrung	möglich

## 6.9 Zusammenfassung – Harzauswahl und Harzvergleich

Als geeignete Reaktionsharze für die geplante Strom UV-Anlage erscheinen folgende:

→Dobeckan MF8004 UV

Dieses Harz auf Polyesterbasis verfügt über entsprechende mechanische und chemische Eigenschaften, jedoch erscheint die thermische Alterung stärker ausgeprägt, als bei anderen Reaktionsharzen ähnlicher Zusammensetzung. Bei Maschinen im Betrieb kann dies zu frühzeitigem Ausfall führen, bedingt durch Rissbildung und der Ausbildung von Kriechwegen für elektrischen Entladungen. Die Option „Heizen im Harz“ ist für dieses Harz gegeben, somit kann die Qualität der Imprägnierung durch eine erwartete Verdoppelung der eingebrachten Harzmenge entschieden verbessert werden.

→Herberts E4011 UV

Dieses Harz verfügt über eine höhere Sprödigkeit im ausgehärteten Zustand als beispielsweise Harze der Dobeckan – Serie, was sich für die elektrischen Maschinen im Betrieb als nachteilig herausstellen könnte. Durch Stromkräfte bedingte mechanische Belastungen in der Nut können zu vermehrter Rissbildung im Harz führen und dies wiederum zu einer Zunahme der unvorhersehbaren Ausfälle. Andererseits ist die Lebensdauer dieses Harzes wiederum größer, der Masseverlust über die Zeit geringer und somit der Qualitätsaspekt der Maschine besser gewährleistet. Analog zu Dobeckan MF8004 UV ist auch die Option „Heizen im Harz“ möglich.

→Dobeckan FT2015 UV

Der Vorläufer dieses Harzes ist bei uns in der Fertigung bereits seit Jahren im Einsatz und besitzt die besten mechanischen und chemischen Eigenschaften, wie aus den vorangegangenen Untersuchungen ersichtlich ist. Ebenso werden diese Eigenschaften durch die lange Erfahrung des Personals empirisch bestätigt. Als einziger Nachteil ist zu nennen, dass aufgrund des notwendigen Anteils an Vinyltoluol die Option „Heizen im Harz“ nicht möglich ist, da sich ein explosionsfähiges Aerosol über dem Harzbecken bilden würde. Somit kann die neue Technologie zwar genutzt, aber nicht in dem Ausmaß wie bei den monomerfreien Harzen eingesetzt werden. Alle übrigen Vorteile der neuen Technologie, wie Energieeinsparung, Emissionsreduzierung und Arbeitsplatzverbesserung bleiben selbstverständlich erhalten. Dennoch erscheint diese Lösung momentan als die Beste, bis die Probleme mit den anderen Harzen, sei es durch zusätzliche Untersuchungen oder technische Neuerungen am sich permanent weiterentwickelnden Sektor der Tränkarze gelöst werden können.

In der Anschaffungsphase der Strom UV Anlage gab es aufgrund von technischen Neuerungen noch die Option mit dieser Anlage nicht nur Statoren sondern auch Rotoren zu tränken. Es gilt nun zu überprüfen, welche dieser Harze über die nötige Kompartibilität der Rotortränkung verfügen, doch wird diese Frage in einem Nachfolgeprojekt gesondert behandelt.

## 7 Technischer Teil - Niederspannungsrunddrahtwicklung

### 7.1 Imprägnierung von kleinen Statoren mittels Stromwärmetechnologie

Zu Beginn des Projektes wurde die Technologie an mehreren 37 kW Statoren evaluiert. Es wurden insgesamt 21 derartige Statoren getränkt um durch Veränderung der Tränkparameter die optimalen Tränkbedingungen zu ermitteln. Weiters konnte man dadurch Erfahrung sammeln in welcher Weise sich die Veränderung diverser Parameter auf die Tränkqualität auswirkt. Dies war eine wichtige Vorarbeit um schließlich Tränkversuche mit Windkraftstatoren (900 kW) durchführen zu können. Die Gefahr einer Fehltränkung sollte dabei möglichst gering sein, nur so war eine Zustimmung des Kunden für eine Versuchstränkung zu erwirken. Eine Neufertigung wegen Totalverlust wäre sehr kostspielig gewesen und hätte mit Projektmitteln nicht finanziert werden können.

Eine Übersicht der besten Ergebnisse für das jeweilige Verfahren bzw. Tränkarz ist in untenstehender Tabelle gegeben.

Tränkart	Harz	Nassharz-Aufnahme [kg]	Trockenharzaufnahme [kg]	Abtropfverlust [kg]	Abdampfverlust [kg]
manuelles Tauchen	Vinytoluolharz	1,10	0,75	0,19	0,18
VPI	Vinytoluolharz	1,20	0,87	0,20	0,12
manuelles Tauchen	Acrylat	1,86	1,23	0,43	0,19
Strom-UV	Acrylat	--	2,10	0,02	~0,03
Strom-UV + Heizen im Harz	Acrylat	--	2,37	0,02	~0,03
Strom-UV	Hochmolekular	--	1,63	0,09	~0,03
Strom-UV + Heizen im Harz	Hochmolekular	--	2,08	0,06	~0,03

Tabelle 6: Harzaufnahme (in Kilogramm) von Statoren mit einer Leistung von 37 kW (Durchmesser 315 mm, je ca. 82 kg), sowie Abtropf- und Abdampfverlust. Der Abdampfverlust bei den mittels Strom-UV-Verfahren getränkten Statoren wurde geschätzt, da es nicht möglich war die Nassharzaufnahme zu bestimmen, die Werte liegen aber selbst bei pessimistischer Schätzung weit unter den Werten der herkömmlichen Tränktechnologie (ca. 1 – 2 % der Nassharzaufnahme).

Mittels einer analytischen Waage (150 kg Tragkraft, Teilung 1 g) konnte die Trocken- und Nassharzaufnahme bestimmt werden. Die Nassharzaufnahme, ist die Aufnahme an Harz unmittelbar nach dem Tauchvorgang und einer für den Prozess geeigneten Abtropfzeit. Beim Strom-UV-Verfahren wurde auf die Bestimmung der Nassharzaufnahme verzichtet, da es einerseits sehr umständlich gewesen wäre und andererseits die Trockenharzaufnahme beeinflusst worden wäre, weil der Prozess unterbrochen worden wäre (Der über 80 kg schwere Stator hätte im feuchten Zustand vom Haken auf die Waage gehoben werden müssen). Bei sehr kleinen Objekten ist dies leichter möglich, so dass errechnete prozentual mögliche Trockenharzaufnahme auf derartigen Daten beruht. Aufgrund des geringen Abtropf- und Abdampfverlustes beim Strom-UV-Verfahren liegt der Wert der Nassharzaufnahme nur ca. 2-3% über der Trockenharzaufnahme.

Aus Tabelle 6 ist deutlich ersichtlich, dass mittels Strom-UV-Technologie ca. doppelt soviel Harz in der Wicklung bleibt als im herkömmlichen VPI-Verfahren.

Beim VPI-Verfahren erfolgt die Aushärtung bei diesen Statoren durch 6-stündiges Erwärmen auf 145°C bei leichter Schrägstellung des Objektes im Ofen. Bei der Strom-UV-Technologie hingegen werden die Wicklungen mittels Stromwiderstandsheizung für nur ca. 20 min (Zeit je

nach verwendetem Harz leicht unterschiedlich) auf ca. 170°C gebracht und dadurch ausgehärtet.

Die Aushärtung im Ofen ist sehr Energieaufwendig. Die Energieeffizienz bei einem Ofen liegt nur etwa bei 40%, die restliche eingesetzte Energie zum Aufwärmen des Ofens geht also ungenutzt verloren. Die Effizienz des Stromwärmeverfahrens liegt bei fast 97%. Dies und die kurze Prozesszeit bedingen eine enorme Energieeinsparung.

Der am meisten ausgeprägte Unterschied beider Verfahren zeigt sich beim Abtropfverlust: Dieser liegt beim Strom-UV-Verfahren nahezu um einen Faktor 10 niedriger als bei der herkömmlicher VPI-Technologie.

Beim Strom-UV-Verfahren wird die Wicklung vor dem Tauchen auf Temperatur gebracht wodurch das Harz aufgrund der Viskositätserniedrigung und begünstigt durch Kapillareffekt leicht in die Wicklung eindringt und aufgrund der Temperatur sehr früh zum Gelieren beginnt. Dies ist der Hauptgrund für den niedrigen Harzabtropf. Ein weiterer Vorteil ist, dass nach dem Austauchen (nach einer kurzen Abtropfzeit) unvermittelt mit der Härtung begonnen werden kann. Das Objekt wird derart rasch auf Temperatur gebracht dass die Gelierung, sofern nicht schon erfolgt, unvermittelt einsetzt.

Zusätzlich ist es auch möglich, die Wicklung während des Tauchens zu wärmen und so bereits im getauchten Zustand eine fortgeschrittene Gelierung zu erreichen, dies stellt jedoch eine stärkere Belastung für das Harz (Alterung) dar. Es kann durch diesen Verfahrensschritt die Harzaufnahme noch weiter gesteigert werden. Da auch ohne Heizen im Harz enorme Harzaufnahmeraten erzielt werden können (90 bis 95%), wird man üblicherweise darauf verzichten. Für Sondermaschinen kann diese Technologie aber durchaus ungeahnte Vorteile bringen.

Beim herkömmlichen Prozess beginnt die Gelierung erst im Ofen, wenn das Objekt langsam die Aushärtetemperatur erreicht. Während dieser Zeit kann das Harz sehr leicht wieder aus der Wicklung auslaufen und führt zu einem Abtropfverlust von ca. 20% und mehr der Nassharzaufnahme.

Die Differenz zwischen Abtropfverlust und Trockenharzaufnahme entspricht dem Abdampfverlust, der als Emission in die Umwelt gelangt (VOC) und beträgt beim herkömmlichen Verfahren je nach Harzart ca. 10 - 16% und beim Strom-UV-Verfahren nur etwa 1 - 2%.

Beim VPI-Prozess ist noch zu erwähnen, dass ein manuelles Tauchen eines Stators ohne Vakuum- und Druckphase zu kaum schlechteren Ergebnissen führt. Das Evakuieren vor dem Fluten mit dem Tränharz führt zu einer um 5 % größeren Harzaufnahme. Der Grund dafür ist die größere Nassharzaufnahme. Das Objekt wird aufgrund des Vakuums vollständig (blasenfrei) mit Harz gefüllt, beim Härten im Ofen läuft das meiste Harz jedoch wieder aus. Die Anwendung einer Druckphase, entlehnt aus der Hochspannungstränktechnologie, ist der Tränkung von Runddrahtwicklungen absolut nutzlos.

Im folgenden Diagramm ist gut zu erkennen, dass beim herkömmlichen Verfahren, so wie in diesem Versuch beim Tauchen bei Raumtemperatur schon nach 2 min mehr Harz Abtropft, wie in der gesamten Abtropfphase beim Strom-UV-Verfahren. Beim manuellen Tauchen werden die ersten 10 Minuten, die das Objekt über dem Tauchbecken verweilt nicht als Abtropfzeit gerechnet, da hier nur überschüssiges Harz, welches aufgrund der großen Viskosität

am Paket anhaftet in das Becken zurücktropft und somit auch wieder verwendet wird. Allerdings fehlt dieser Harzanteil als Sekundärisolation in der Wicklung.

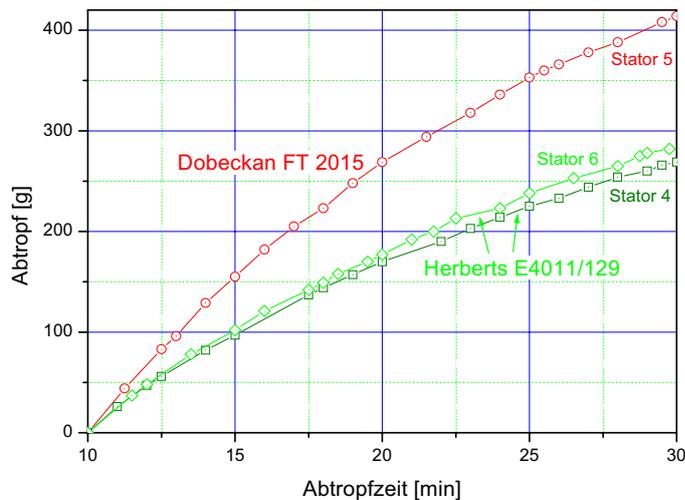


Abbildung 15 :  
 Abtropfverhalten zweier Tränklarze (Dobeckan FT 2015, Herberts E4011/129) 10 min nach dem der Stator aus dem Harzbecken gehoben wurde. In den ersten 10 Minuten tropft vor allem das außen anhaftende überschüssige Harz ab, dieser Abtropf liegt bei ca. 0.8 – 0.9 kg. Beim herkömmlichen Verfahren vergehen ein bis zwei Stunden bis das Objekt die Gelierungstemperatur erreicht, bis dahin kann das Harz auch wieder relativ leicht aus der Maschine auslaufen, da die großen Hohlräume zwischen den Kupferbündeln das Harz schlecht zurückhalten.

Im obigen Diagramm wurde ein übliches UPI-Tränkarz mit einem Acrylathältigen Tränkarz mit thixotroper Einstellung verglichen. Das thixotrope Harz zeigt einen geringeren Abtropfverlust, ist in der Anwendung dem anderen Harz jedoch nicht überlegen da insgesamt mehr Harz an dem Objekt anhaftet und der Abtropfverlust prozentuell kaum geringer ist und Mengenmäßig sogar größer ist als zum verglichenen nicht-thixotropen Harz..

Aufgrund der Ergebnisse dieser Versuche ist es ratsam, bei herkömmlichen VPI-Verfahren die oftmals gewählte 10 minütige Abtropfzeit auf 30 Minuten zu verlängern. Somit kann Harz gespart, der Abtropf (im Ofen) und somit auch die Emission verringert werden.

Für das Stromwärmeverfahren bzw. im speziellen Strom-UV-Verfahren sind Harze notwendig, welche über einen zusätzlichen UV-Initiator verfügen. Geeignete Harze sind Herberts E4011 UV und Dobeckan MF8004 UV (bzw. die Vorgängerharze Dobeckan MF 8001 UV, und Dobeckan MF 8002 UV). Alternativ dazu wäre die Stromwärmetechnologie auch ohne UV härtende Harze durch kombinierte Aushärtung im Ofen (sog. Strom-Ofen-Härtung) anwendbar. Dies würde aber das Energieeinsparungspotential und somit einen der Hauptvorteile dieses Verfahrens wieder zunichte machen.

Die Strom-UV-Technologie kommt ganz ohne Vakuum- und Druckphase aus, da Objekte mit Runddrahtwicklungen aufgrund der Kapillarwirkung leicht durchtränkt werden und durch die rasch einsetzende Gelierung das Harz daran gehindert wird wieder auszulaufen. Der Einsatz einer Vakuumphase im Strom-UV-Verfahren könnte die Harzaufnahme nur mehr unwesentlich steigern und steht in keinem Verhältnis zum technischen Aufwand. Der elektrische Vergleich von zwei im Strom-UV-Verfahren getränkten Statoren und zwei im herkömmlichen Verfahren (VPI-Verfahren) getränkten Statoren zeigt eindeutig, dass die Strom-UV-Technologie zu besseren Ergebnissen führt.

Die elektrische Messung von Motoren mit 37 kW Leistung, welche mit Herberts E4011UV (Acrylatharz) und Dobeckan MF8001UV (monomerfreies Harz) mit dieser neuen Technologie getränkt wurden, zeigen, dass die Erwärmung der Wickelköpfe tendenziell kühler (2 – 3 K) ist und die Wärme gleichmäßiger auf beiden Seiten der Wickelköpfe verteilt ist. Auf jeden Fall ist die generell niedrigere Temperatur am Wickelkopf bei den mit Stromwärme getränk-

ten Maschinen auf die bessere Harzfüllung im Nutbereich zurückzuführen, sodass eine bessere Wärmeleitung über die Nut zum Wasserkühlmantel des Gehäuses stattfinden kann. Bei Betrachtung des wärmeren Wickelkopfes beträgt der durchschnittliche Wärmeunterschied zu herkömmlich getränkten Maschinen  $4.4 \pm 1^\circ\text{C}$  (siehe Tabelle unten).

Verfahren	Harz	Pt-100	Pt-100	Pt-100	□ Nut	Mittl. Erw.	Raum	Geh.						
		Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	MW AS	MW BS					
Strom-UV	Dobeckan MF 8001 UV	99,7	102,5	99,1	101,5	102,6	100,6	100,4	101,6	101,0	87,5	55,6	23,1	37,6
Strom-UV	Herberts E4011 UV	100,0	101,1	100,6	101,7	102,8	102,2	100,6	102,2	101,4	89,6	56,0	20,4	37,9
VPI herkömmlich	Dobeckan FT2015	101,0	101,0	101,0	106,0	108,0	105,0	101,0	106,3	103,7	91,0	58,0	23,0	38,5
Herkömmlich, ohne Vakuum	Herberts E4011/129	101,0	101,0	101,0	106,0	108,0	105,0	101,0	106,3	103,7	91,0	56,9	23,0	38,5

Tabelle 7: Temperaturen [in °C] aus den Erwärmungsläufen von Maschinen mit einer Leistung von 37 kW. Pt-100 Nr.1-3: Temperaturfühler im Wickelkopf auf der Antriebsseite (AS) (=Anschlussseite); Pt-100 Nr.4-6: Temperaturfühler im Wickelkopf auf der Bürstenseite (BS), Nut-Pt-100: Temperaturfühler 5 cm in einer Nut am Nutgrund; weiters sind die Temperaturen der Raumumgebung und des Gehäuses angegeben.

In folgender Abbildung ist der Temperaturverlauf eines kleinen Stators (37 kW Leistung) beim Tränken mittels Strom-UV-Verfahren dargestellt. Die Tränkung kann erst erfolgen wenn auch das Blechpaket eine genügend große Temperatur besitzt damit beim Tränkvorgang die Wicklung durch das kalte Blechpaket nicht zu stark abkühlt. Um den Vorgang zu beschleunigen oder bei sehr großen Statoren kann das Paket zusätzlich induktiv mit HF erwärmt werden. Selbst tonnenschwere Pakete können so innerhalb von 15 – 20 Minuten auf  $100^\circ\text{C}$  gebracht werden.

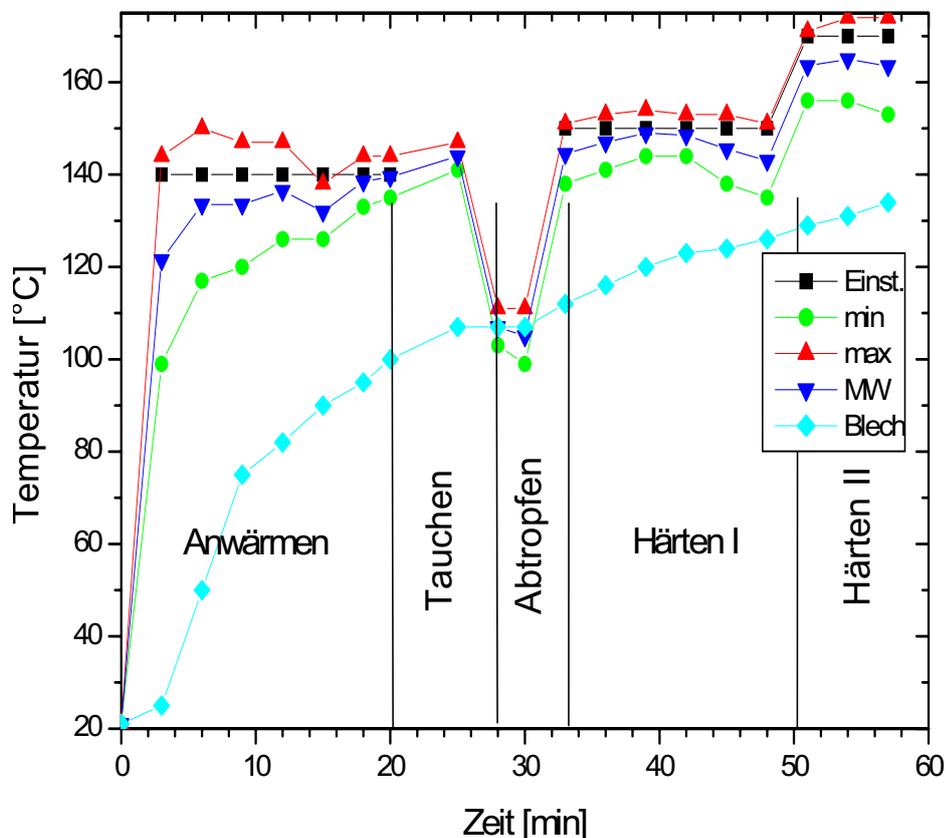


Abbildung 16: Temperaturverlauf am Wickelkopf und in der Nut beim Strom-UV-Verfahren (Trockenlauf). Von 6 Wickelkopffthermometern zeigte eine eine stärkere Temperaturabweichung zu geringeren Temperaturen, sodass der Mittelwert leicht unterhalb der PC-Einstellung liegt, die anderen 5 Wickelkopffthermometer liegen sehr nahe am eingestellten Wert.

## 7.2 Der $K_r$ -Faktor

Unter dem  $K_r$ -Faktor versteht man prinzipiell das Verhältnis zwischen dem Widerstand bei Wechselstrom zum ohmschen Widerstand (gemessen bei Gleichstrom). Dieser Faktor wird durch eine so genannte Bohrungsfeldmessung vor Einbau des Rotors in den Stator bestimmt. Diese Messung wird üblicherweise bei einem getränkten Stator durchgeführt, prinzipiell ist eine Messung aber auch bei einem ungetränkten Stator möglich.

Der  $K_r$ -Faktor zeigt Informationen über die Zusatzverluste durch Stromverdrängung, wobei die Stromverdrängung den Hauptgrund für das Entstehen von Zusatzverlusten darstellt. Einen wesentlich geringeren Einfluss stellen freilich noch andere Faktoren, wie Blechgüte, Stanzgrad und Einbauart der Wicklung dar, jedoch beeinflussen sie die Erwärmung nur peripher.

Um nun einen echten Vergleich anstellen zu können, wurde für dieses Projekt genau darauf geachtet, Statoren mit vergleichbaren Blechen (bezüglich Leistung und Stanzgrad) und exakt denselben Wicklungsdetails heranzuziehen. Der Einfluss der Rotorgeometrie auf die Erwärmung ist zwar gering, dennoch wurde ebenso darauf geachtet, ähnliche Typen für diesen Vergleich zu verwenden.

Einige Statoren unterschiedlicher Wicklungsarten wurden ebenso vermessen, um die Größenordnung der wesentlichen Einflüsse zu verifizieren.

Außerdem wurden auch ungetränkte Statoren vermessen um den Einfluss des Harzes auf den  $K_r$ -Faktor zu bestimmen. Jedoch war dieser Einfluss auf die Zusatzverluste sehr gering, sodass anzunehmen ist, dass das Harz die Erwärmung gering beeinflusst, dieser aber in der statistischen Streuung der Messwerte nicht nachzuweisen war.

In Windkraftanlagen wird die Temperatur ständig überwacht. Sollte durch böigen oder stürmischen Wind der Generator zu lange im Überlastbereich betrieben werden, sodass sich die Temperatur zu stark erhöht, so wird dieser abgeschaltet. Diese Notabschaltung erfolgt bereits einige Kelvin unter der festgelegten Maximaltemperatur.

Es wird gefordert, dass die Generatoren dauerhaft weit unter der Abschalttemperatur betrieben werden können, damit die Ausfallszeit der Generatoren möglichst gering ist. Im Idealfall sollte ein Generator 10 bis 20 Jahre ununterbrochen durchlaufen können.

Die mit Strom-UV getränkten Maschinen sind in der Nut tendenziell heißer, dies hat vermutlich mit der besseren Wärmeleitfähigkeit der gut durchtränkten Wicklung zu tun. D. h. es wird mehr Temperatur in das Blechpaket geschoben als in den Wickelkopf.

Allgemein bewirkt die verbesserte Tränkqualität somit auch eine besser Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zur VPI-Technologie.

## 7.3 Erwärmung des Blechpaketes

Beim Tränken eines Stators mittels Stromwärme ist es notwendig, dass das Blechpaket vorgewärmt wird, da sonst der Temperaturunterschied zwischen Wicklung und Paket so groß ist, dass nach Abschalten des Stromes das Wickelkupfer in der Nut aufgrund des kalten Blechpaketes sehr schnell abkühlt, wobei das Kupfer im Wickelkopf bereich weniger schnell abkühlen kann. Dies führt zu einem schlechteren Eindringen des Harzes in die Nut und sollte daher vermieden werden. Es gibt zwei Möglichkeiten das Blechpaket zu wärmen. Entweder kann durch prolongiertes Heizen mit Stromwärme das Blechpaket langsam aufgrund des Wärmeüberganges gewärmt werden, oder man erwärmt das Blechpaket mit Hochfrequenz, indem man eine Schleife um das Paket legt (durch die Bohrung) und HF (ca. 4 kHz) anlegt. Vorher wurde noch ein Versuch durchgeführt, um die Pakete mittels einer Mittelfrequenz – Induktionsanlage aufzuwärmen.

### 7.3.1 Erwärmung mittels MF Induktion

Ein Stator von 740kg wurde mittels einer MFG 70 Induktivlötanlage der Fa. ELDEC durchgeführt. Zunächst wurde eine Glasfasermatte um den Stator gewickelt, danach wurden die Glühkabel angebracht. Zuvor wurde der Stator noch mit Indikatorfarben präpariert, um die erreichte Temperatur zu ermitteln.

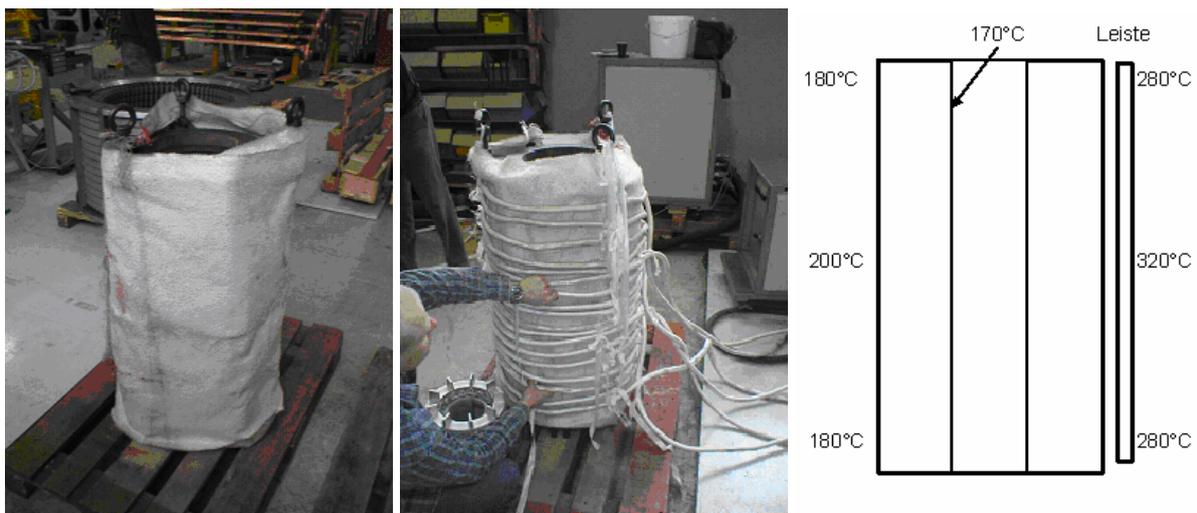


Abbildung 17: Umwickeln des Stators mit einer Glasfasermatte und den Glühkabeln, schematische Temperaturverteilung

Am Schema rechts kann man gut die erreichten Temperaturen erkennen, jedoch wurden an der Leiste sehr hohe Temperaturspitzen erreicht, die sich nach längerer Standzeit aber ausglich. Dennoch wurde von dieser Art der Vorwärmung abgesehen, da man für die Vorbereitung der MF Erwärmung im Vergleich zur HF Erwärmung zu viel Zeit und Personal benötigt. Zum Erreichen der Temperatur wurde eine Leistung von 56 kW benötigt, was einer Ausbeute von 80% entspricht.

### 7.3.2 Erwärmung mittels HF

Beim Stator Nr. 4 wurde die Erwärmung des Blechpaketes mittels Hochfrequenz erreicht. Die Erwärmung am Paketrückten wurde mittels Magnetthermofühler gemessen.

Die zeitliche Abfolge der Prozessschritte ist in Tabelle wiedergegeben, die Temperaturkurven der Pt-100 Messpunkte sind aus Abbildung zu entnehmen.

Vorgang (Prozeß)	Dauer [min]	Vorgang (Prozeßpunkte)	Zeit [min]
HF-Wärmung Paket	29	Aufschalten U1	29,5
Stromwärmung Wicklungen	10	Abtauchen Stator	39,3
Eintauchen	2	Vollständig eingetaucht (benetzt)	41,0
Tauchzeit	2	Start Austauchen	43,3
Austauchen	5	Ende Austauchen	48,3
Abtropf (ohne Wärmen)	13	Härten (Aufschalten U1 auf 160°C)	61,5
Härten	40	Härten, Ende	101,0
Gesamtprozeßdauer	101		

Tabelle 8: Übersicht eines Strom-UV Prozesses

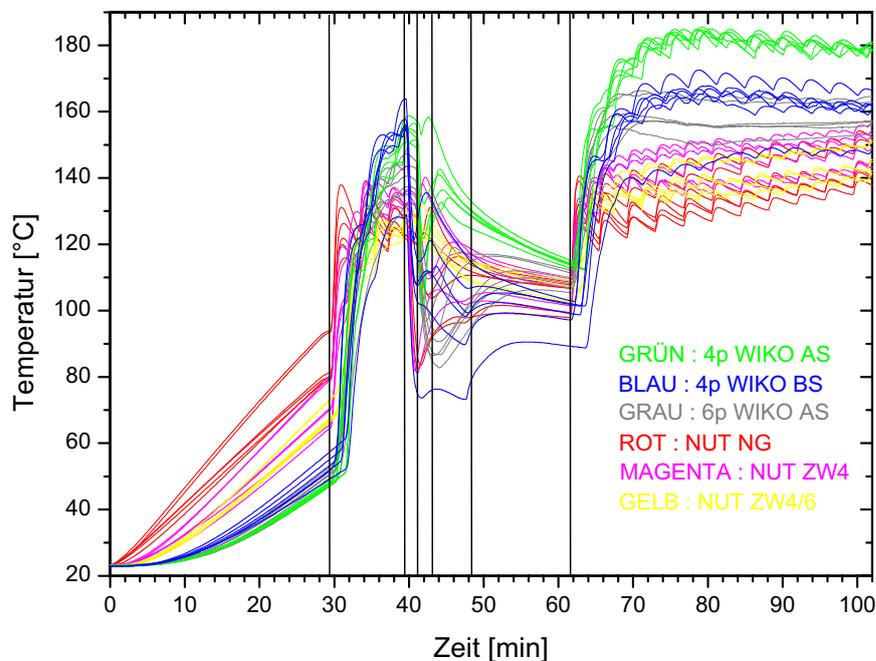


Abbildung 18:  
Temperaturverlauf von 36 Pt-100 beim Tränkungsverfahren mit Stromwärme.

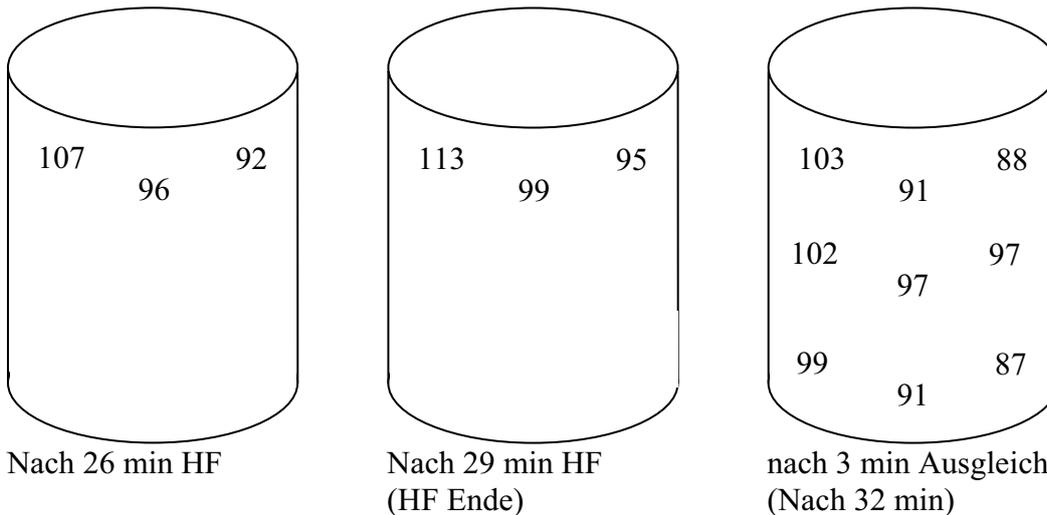


Abbildung 19: Übersicht über die Temperaturverteilung am Blechpaket

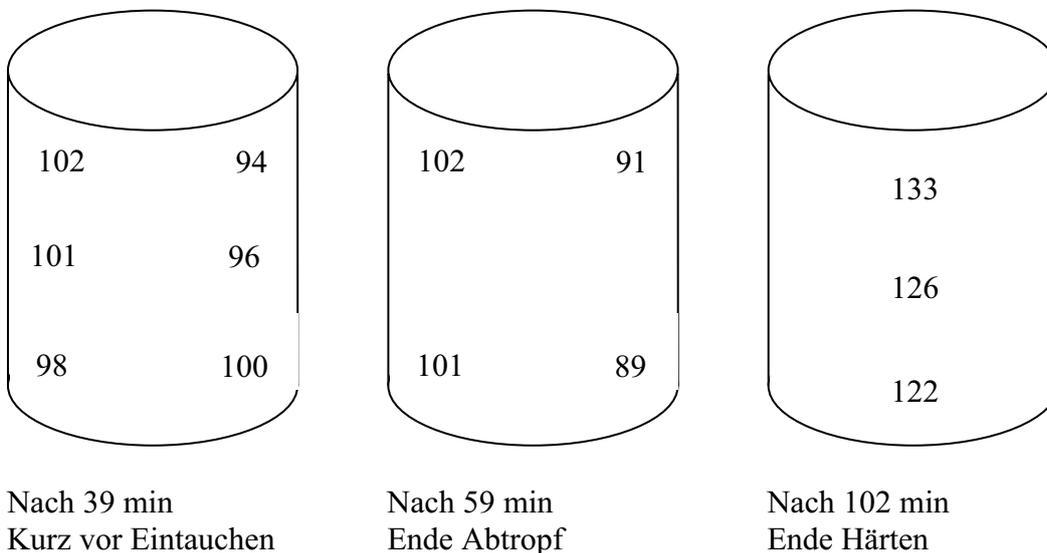


Abbildung 20: Abweichungen bei der Erwärmung eines Stators während des Tränkvorganges beim Strom-UV-Verfahren.

### Vergleich der Erwärmungsläufe von Windgeneratoren

Insgesamt kann man erkennen, dass die Maschinen in der Erwärmung mindestens gleichwertig sind, sie liegen tendenziell im Trend des  $K_r$ -Faktors. Es zeigt sich, dass der gegenüberliegende Wickelkopf (BS) bei den mittels Strom-UV-Verfahren getränkten Maschinen bei der jeweiligen Maschine tendenziell etwas kühler ist als der AS-Wickelkopf. Bei den herkömmlich getränkten Maschinen ist der BS-Wickelkopf etwas wärmer als der AS-Wickelkopf.

Auch bezüglich der Erwärmung in der Nut zeigt sich ein ähnliches Bild. Die Erwärmungsdaten zeigen in etwa den Trend des  $K_r$ -Faktors.

## 7.4 Verhalten im Steady-State

Im Betrieb erwärmt sich der Generator aufgrund verschiedener physikalischer Effekte, wobei Verlustleistungen, welche durch Stromverdrängungseffekte begründet sind, die Hauptursache der Erwärmung darstellen. Es ist schwierig die Erwärmung eines Generators zu berechnen. Es existieren zwar verschiedene aufwändige Berechnungsprogramme, diese können jedoch nur sehr eingeschränkt verwendet werden. Selbst bei kleinen konstruktiven Änderungen kann es passieren, dass ansonsten vernachlässigbare Effekte eine so große Rolle spielen, dass Modellrechnungen falsche Werte liefern. Deshalb wird bei jeder konstruktiven Änderung ein Prototyp gefertigt, welcher einer ausführlichen elektrischen sowie thermischen Prüfung unterzogen wird. Hauptkriterium ist die Erwärmung eines Generators, welche durch einen so genannten Erwärmungslauf festgestellt wird. Dabei wird der Generator bei einer definierten Last (z. B. 100% oder in vielen Fällen auch 110%) so lange betrieben, bis die Temperatur des Generators sich nicht mehr ändert und dieser sich somit im Steady-State befindet. Die Temperaturen im Steady-State werden durch an verschiedenen Stellen befindlichen Thermosensoren (Pt-100 Messfühler) abgegriffen und protokolliert. In der Praxis wird ein Generator als im Steady-State befindlich bezeichnet, wenn sich die Temperatur nicht mehr als 1 Kelvin pro Stunde ändert. Oft wird auch eine maximale Änderung von 2 Kelvin pro Stunde akzeptiert, insbesondere wenn es sich um Serienvergleiche handelt.

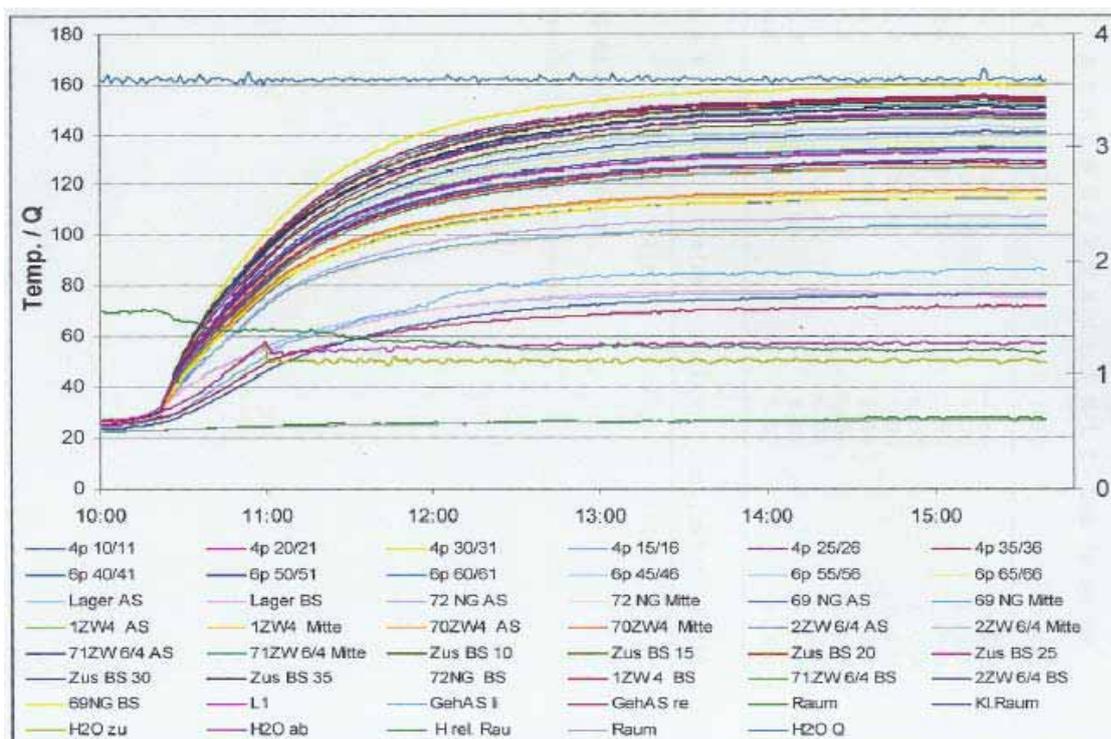


Abbildung 21: Erwärmung eines Stators im Prüffeld, gut zu erkennen ist dass nach 5 Stunden der Generator sich im Steady-State befindet. Es ist ebenfalls gut erkennbar, dass die Temperatur im Nuthereich und am Blechpaket geringer sind als im Wickelkopf.

Erwartungsgemäß wird der Steady-State bei Strom UV getränkten Maschinen früher erreicht, bewirkt durch die bessere Wärmeverteilung aufgrund der besseren Tränkqualität. In der obigen Abbildung ist auch gut zu erkennen, dass die maximalen thermischen Belastungen unter 150°C liegen, die für eine Maschine der Temperaturklasse F (= 155°C Dauertemperaturbelastung) nicht weit überschritten werden darf um die Isolationsmaterialien nicht zu schädigen. Für Sonderanwendungen gibt es noch die Auslegung in Klasse H (180°C) und darüber.

## 7.5 Dielektrische Messungen

Das Auftreten von Verlusten in stromdurchflossenen Medien hat zwei grundsätzliche Ursachen. Zum einen ist selbst in Isolatoren immer eine geringe Restleitfähigkeit vorhanden, wodurch ein so genannter Querstrom fließen kann. Jeder ohmsche Stromfluß führt somit zu Wärmeverlusten. Zum anderen werden die Dipole in einem Wechselfeld ständig gedreht bzw. aufgebaut, wobei dielektrische Wärmeverluste durch Reibung der Teilchen aneinander auftreten.

Die Größe der dielektrischen Verluste wird unter anderem durch den Verlustfaktor  $\tan \delta$  ausgedrückt. Dieser Wert entspricht dem Tangens des Verlustwinkels zwischen Imaginär- und Realteil der Spannung. Kleine Verlustwinkel und Verlustfaktoren deuten auf geringe dielektrische Verluste hin. Ein wesentliches Kriterium für einen gut durchtränkten Stator ist demnach ein geringer Anstieg des  $\tan \delta$ -Wertes bei höheren Spannungen. Je besser ein Stator durchtränkt ist, desto weniger Lufteinschlüsse befinden sich in der Wicklung. Lufteinschlüsse wiederum, im engl. als *faults* bezeichnet, also Fehler, führen bei höheren Spannungen zu Glimmentladungen bzw. Teilentladungen. Die Spannung, bei der die ersten Glimmentladungen auftreten, nennt man Glimmeinsatzspannung. Große Werte für diese Glimmeinsatzspannung sind ein Zeichen für eine gute Durchtränkung mit wenigen Fehlstellen bzw. Luftblasen. Ein weiteres Kriterium ist der Anstieg der Intensität der Glimmentladungen charakterisiert durch den  $\tan \delta$ -Wert, bezogen auf die Grundlinie (bzw. auf den  $\tan \delta$ -Wert vor dem Einsetzen der Glimmentladung). Ein niedriger  $\tan \delta$ -Wert und eine geringe Steigung ab dem Punkt der Glimmeinsatzspannung ist bezeichnend für die Isolationsgüte bzw. der Fehlerfreiheit des Wicklungsisolationsystems bzw. im Besonderen der Sekundärisolation.

Auffällig ist, dass die Absolutwerte des im Strom-UV-Verfahren getränkten Generators weit höher liegen als die des im VPI-Verfahren getränkten Stators. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei diesem Stator ein anderes Harz verwendet wurde, welches für das Strom-UV-Verfahren geeignet ist. Dieses ungesättigte Polyesterharz auf Acrylatbasis, Herberts E 4011 UV, besitzt eine andere Dielektrizitätskonstante, als das Vergleichsharz. Diese Dielektrizitätskonstante ist maßgebend für den Anfangswert bei der Verlustfaktormessung. Im Niederspannungsbereich kann mit Sicherheit ein negativer Einfluss aufgrund unterschiedlicher Dielektrizität der Sekundärisolation ausgeschlossen werden. In der Hochspannung kann diese Frage nicht so einfach beantwortet werden. Hier kann dies sehr wohl einen Einfluss haben. Allerdings gibt es kaum Literatur über diese spezielle Fragestellung, auch gibt es hier unterschiedliche Expertenmeinungen.

Gerade für Generatoren und Motoren welche an Umrichtern betrieben werden ist ein möglichst spätes Einsetzen der Teilentladung gefordert. Durch die exakte Prozesskontrolle im Strom-UV-Verfahren ist hier mit einer gleichmäßigen Qualität zu rechnen, so dass nicht jede Maschine bzw. Generator auf dessen dielektrischen Eigenschaften hin untersucht werden muss, sondern nur der jeweilige Prototyp.

Bezüglich des Themas dielektrische Messungen und Teilentladung ist aufgrund der Komplexität dieses Themas ein eigenständiges Projekt gestartet worden. („Umrichtertauglichkeit von Träufelwicklungen“, Projektleiter EMG-TE1 Hr. Nast; ein Auszug aus den bisherigen Erkenntnissen findet sich auf Seite 55).

## 7.6 Tränkversuche mit Dobekan FT 2015/60 EK

Dieses ungesättigte Polyesterharz besteht zu etwa 40% aus Vinyltoluol, welches als Reaktivverdünner dient und somit gleichzeitig Lösemittel und Reaktionspartner darstellt. Durch den hohen Dampfdruck von Vinyltoluol bei den bei der Härtung auftretenden Temperaturen lässt es sich nicht vermeiden, dass ein Teil des Vinyltoluols verdampft, bevor es mit anderen Komponenten im Harz reagieren kann. Aus Versuchen ist bekannt, dass bis zu 50% des im Harz befindlichen VT in die Umwelt gelangen kann, wenn nach dem VPI – Verfahren getränkt wird.

Für die Mitarbeiter an der Tränkanlage bestehen beim Umgang mit Vinyltoluol ernsthafte Gefahren. Bei einer inhalativen Aufnahme von Vinyltoluol kommt es zu Halsschmerzen, Kopfschmerzen, Schwindel, Apathie und Müdigkeit. Es entfettet die Haut und trocknet sie so aus. Zusätzlich ist eine Rötung und Schmerzen erkennbar. Vinyltoluol kann auch über die Haut aufgenommen werden. Bei einer Einwirkung auf das Auge tritt auch hier eine Rötung und Schmerzen auf. Der Stoff reizt immer die Atemwege, die Augen und die Haut, auch wird eine gewisse kanzerogene Wirkung vermutet. Somit müssen die Emissionen möglichst gering gehalten werden.

Im Falle der Anwendung der Strom UV Technologie werden die Statoren innerhalb kürzester Zeit auf Aushärtetemperatur gebracht, somit liegt die Zeitspanne, in der VT verdampfen kann, nur mehr im Minutenbereich, statt der üblichen Aushärtung im Ofen, welche viele Stunden dauert. Auch wird bei den hohen Temperaturen im Zuge der schnelleren Gelierung auf der Oberfläche des Harzes ein Film aufgebaut, welcher die Verdampfung weiteren Vinyltoluols verhindert. Aus diesen Gründen ist bei dieser Technologie mit einem verstärkten Einbau von VT und extrem geringen Emissionen zu rechnen. Weiters besteht aufgrund der kompakten und modularen Bauweise keine Gefahr mehr, dass ein Mitarbeiter in Kontakt zu Harzdämpfen gerät.

Tränkart	Harz	Naßharzaufnahme (kg)	Trockenharzaufnahme (kg)	Abtropfverlust (kg)	Abdampfverlust (kg)	einreagierte VT Menge
Kalt tauchen	FT 2015/60	1,5	0,744	0,549	0,24	-
VPI	FT 2015/60	1,2	0,87	0,2	0,12	-
Strom UV	FT 2015/60 UV	0,93	0,883	0,031	0,016	-
		(%)	(%)	(%)	(%)	
Kalt tauchen	FT 2015/60	100	49	36	15	37,5
VPI	FT 2015/60	100	72	18	10	75
Strom UV	FT 2015/60 UV	100	95	3,3	1,7	95,75

Tabelle 9: Übersicht der verschiedenen Tränkarten zur Harzaufnahme bei Statoren mit 315mm Durchmesser, 370mm Länge und 80kg Gewicht

Beim Strom UV Verfahren verbleiben nach dem Härten insgesamt 95 % des Harzes im Stator, beim VPI nur maximal 72 %. Bezogen auf das Vinyltoluol bedeutet dies, dass 95 % im Stator verbleiben, weitere 3,3 % chemisch gebunden sind, welches vom Stator abtropft und nur 1,7 % als Emission in die Umwelt gelangt.

Somit kann zusammengefasst werden, dass 95,75% des Vinyltoluols chemisch gebunden werden. Aufgrund der herausragenden Eigenschaften des Harzes wird eine Dobeckan FT2015 Variante mit UV Initiator für die geplante Strom UV Anlage angedacht.

## 7.7 Harzbelastung

Da bei dieser Technologie im Kupfer Temperaturen um 150°C erreicht werden, stellt sich die berechnete Frage nach der thermischen Beanspruchung des Harzes in der Umgebung und nach etwaigen Alterungseffekten.

Allgemein versteht man unter Alterungseffekten ein Ansteigen der Viskosität und eine Zunahme der Reaktivität. Beides führt zu schlechteren Tränkqualitäten oder zu einem unvollständigen Aushärten des Harzes. Dennoch liegt in der Prozesssteuerung und dem technischen Design des Tränkbeckens die Lösung zur Verhinderung dieser Phänomene. Im Vergleich zur VPI-Technologie, wo vor jeder Tränkung das Harz auf Imprägniertemperatur gebracht werden muss und anschließend wieder abgekühlt wird um ein vorschnelles Altern des Harzes zu vermeiden, wird bei der Strom UV Technologie bei Raumtemperatur getränkt.

Zunächst einmal die Betrachtung der Verweilzeit, um die allgemeinen Alterungseffekte des Harzes bei kontinuierlicher Tränkung zu erfassen.

$$\tau_h = \frac{V_R}{\dot{V}}$$

Die hydrodynamische Verweilzeit  $\tau_h$  ergibt sich aus dem Volumen des Tränkkessels ( $V_R$ ) und dem Volumenstrom  $\dot{V}$ . Dieser Volumenstrom entspricht in unserem Fall dem bei der Tränkung aus dem System entfernten Harz pro Tag.

$$\tau_h = \frac{5000\text{kg}}{100\text{kg}/24\text{h}} = 50\text{Tage} (\dots)$$

Somit wird alle 50 Tage der komplette Harzinhalt des Behälters aufgetauscht. In diesem Zeitraum sind keine Alterungseffekte bei einem Reaktionsharz zu erwarten, welche die Qualität der Tränkung beeinflussen könnten.

Dennoch stellt sich noch die Frage ob diese Effekte nicht beschleunigt am Kupfer bei stark erhöhten Temperaturen auftreten könnten. Aufgrund physikalischer Phänomene sind solche Effekte unwahrscheinlich. Beim Tränken wird in der Nähe des heißen Kupfers das Harz partiell angeliert und somit in der Nut gehalten, anderes Material in der Nähe steigt aufgrund des Auftriebes an die Oberfläche. Dort wird das Harz mittels zirkulierender Strömung über eine Pumpe abgeschöpft. Dann läuft es über einen gekühlten Überlauf in ein Sammelbecken und wird dort wieder auf etwa 20°C heruntergekühlt. Da dieser Prozess in äußerst kurzer Zeit vonstatten geht, und sich auch bei stärker erwärmten Harz noch weiter beschleunigt, da ja stark ausgeprägte Wirbelströmungen entstehen, die das Harz noch schneller an die Oberfläche befördern, ist auch hierbei keine vorschnelle Harzalterung zu erwarten.

## 7.8 Umrichtertauglichkeit

Umrichter wandeln einen Wechselstrom in eine andere Form eines Wechselstroms um, wobei es keine Rolle spielt, welche Stromart erzeugt wird.

Der "Stromrichtermotor" gehört zur Gruppe der Frequenzumrichter, mit denen Drehstromenergie fester Eingangs-Netzfrequenz in Drehstromenergie veränderlicher Ausgangsfrequenz umgeformt wird. Der eingangsseitige netzgeführte Stromrichter und der lastgeführte Maschinenstromrichter (Wechselrichter) sind über Zwischenkreisdrosseln energetisch entkoppelt, wobei im Zwischenkreis ein nichtlückender Gleichstrom eingepreßt wird.

Für die Umrichtertauglichkeit einer Runddraht – Wicklung ist es nun notwendig zu bestimmen wie groß die Beanspruchung der Wicklungen im Betrieb ist. Dabei treten noch Spannungsspitzen auf, welche ein Vielfaches der Zwischenkreisspannung betragen können.

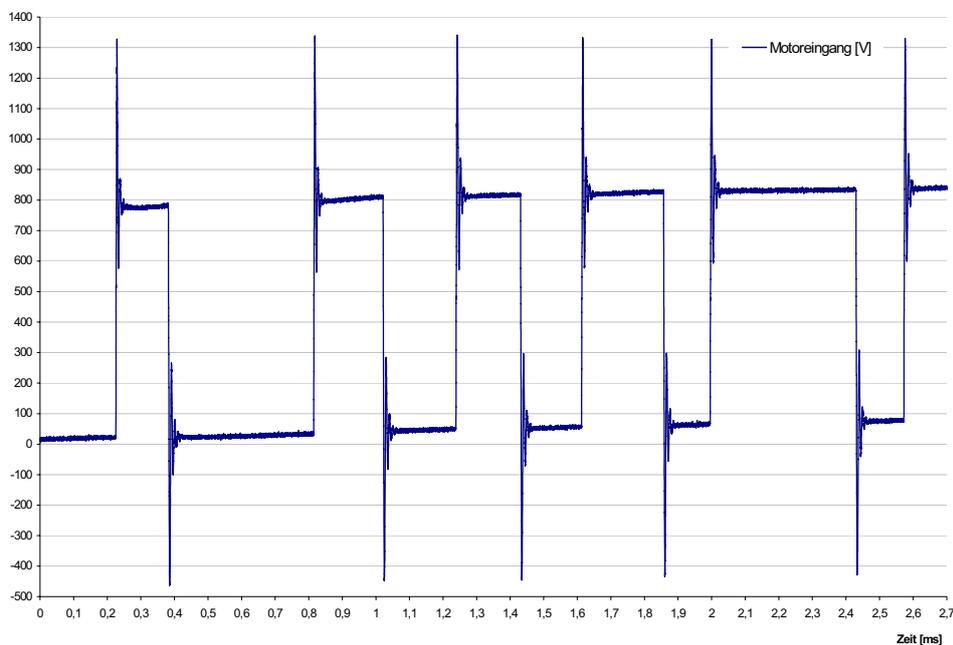


Abbildung 23: Diese Kurve zeigt die hohen Spannungsspitzen an einem Umrichter

Eine ausführliche Beurteilung der Qualität der Isolation ist notwendig, um die Umrichtertauglichkeit einer Maschine einzuschätzen. Dafür eignen sich Teilentladungsmessungen an Statorn und Probestücken (Phasendiagramm und/oder Glimmeinsatzspannung), Durchschlagsprüfungen an Probestücken und Lebensdauerprüfungen an Motoretten, laut IEC 60034-18-21.

## 7.8.1 Teilentladung

Allgemein versteht man unter der Wirkung der Teilentladung einen funkenerosiven Abtragsprozess, der durch die wiederkehrende Bildung freier Elektronen in ionisiertem Hohlraum vonstatten geht. Eine allmähliche Zerstörung des umgebenden Isoliermaterials durch lokale Aufschmelzung oder Verkohlung ist die Folge. Kommt es schließlich zu einer vollständigen Überbrückung der Fehlerstelle, dann erfolgt der Durchschlag lawinenartig, wobei ein Lichtbogen mit großer Stromdichte und hoher Temperatur entsteht. Dieser Lichtbogen bedingt die Aussendung elektromagnetischer Hochfrequenzimpulse und sogar einer Geräuschabstrahlung bei sehr starker Teilentladungsaktivität. Durch die Ionisation der Umgebungsluft kommt es zu einer Ozonbildung in der Umgebung der Teilentladung.

Die äußere Teilentladung (Korona) an freien Elektroden oder am AGS-Ende ist sichtbar, hörbar und riechbar (Ionisationseffekte, Ozon).

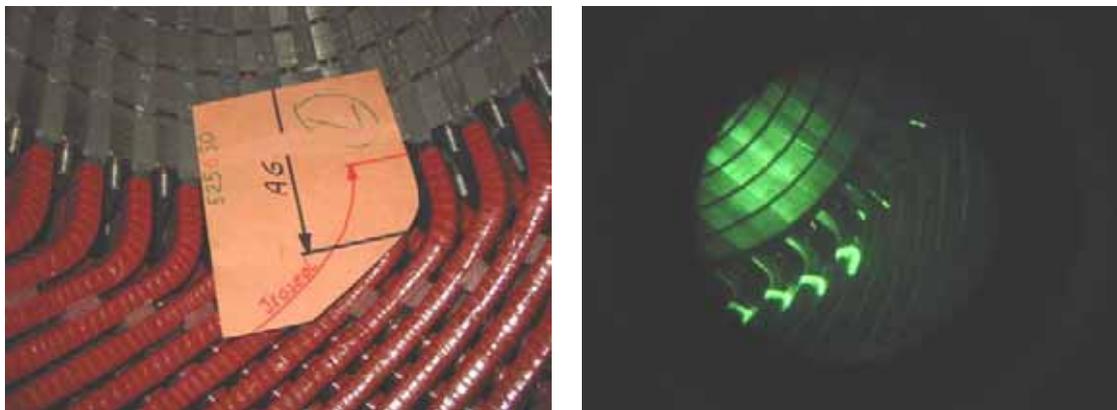


Abbildung 24: Visualisierung einer Teilentladung mittels UV Licht

Die innere Teilentladung findet ausschließlich im Inneren des Isolationsmediums statt, wobei Stellen großer Inhomogenität des elektrischen Feldes sehr bevorzugt sind. Dieses Phänomen wird „Spitzenwirkung“ genannt und findet vorwiegend am Paketende, an Lüftungsschlitzen oder Phasentrennstellen im Wickelkopf statt. Ebenso sind bevorzugt sind Hohlräume oder Lufteinschlüsse (kleine Dielektrizitätszahl) im Isolationsmedium.

Um eine Teilentladung zu messen gibt es mehrere Möglichkeiten:

Zum einen kann man spezielle Prüfschaltungen zur Ladungsmessung (kapazitive Teiler) verwenden. Dabei hat man die Möglichkeit eine frequenzselektive Messung (Einsatzspannung) durchzuführen und mittels eines Phasendiagramms den TE – Typ zu charakterisieren. Ebenso kann man sich elektromagnetischer Messung mit Richtantennen bedienen, oder auch eine Geräuschemessung durchführen (Luftschall und Körperschallmessaufnehmer). Als indirekte Messmethode sei noch die Ozonmessung genannt. Zu diesen Messungen sei noch bemerkt, dass alle äußerst stöempfindlich sind. Die Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchtigkeit, Netzbedingungen, Grundstörpegel etc. können die Messungen gravierend verfälschen. Deswegen ist es zweckdienlich vor allem Vergleiche innerhalb einer Messserie anzustellen.

Die nachstehenden Phasendiagramme wurden durch eine frequenzselektive Messung der Einsatzspannung durchgeführt und der Verlauf der Kurven ist typisch für den Aufbau der Motoretten. Aufgetragen wird dabei die Ladung gegen den Phasenwinkel und je höher die Ein-

satzspannung und stärker die Teilentladungen, desto stärker ist das „Rauschen“ unter den Phasenkurven ausgeprägt.

*TE-Messungen an Motoretten 3L-Draht VPI Tränkung mit DOBEKAN FT 2015*

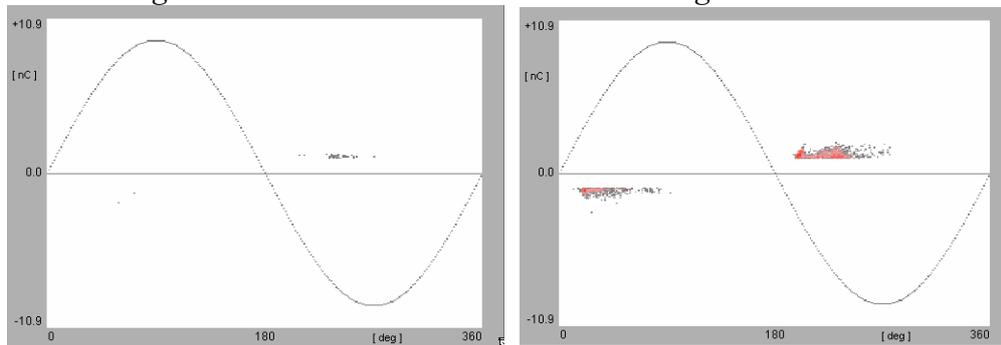


Abbildung 25: links Motoretten mit VPI 2,5 kV gegen Eisen, rechts Motoretten mit VPI 3,2kV gegen Eisen

*TE-Messungen an Motoretten 3L-Draht Strom-UV Tränkung mit DOBEKAN MF 8004*

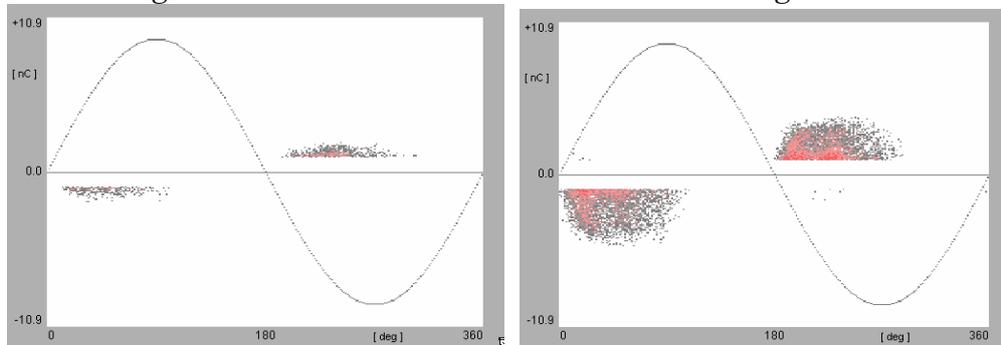


Abbildung 26: links Motoretten Strom-UV, 2,3kV gegen Eisen, rechts Motoretten Strom-UV, 3,1kV gegen Eisen

Entgegen der Erwartungen zeigen die Untersuchungen an den mittels Stromwärme getränkten Motoretten ein schlechteres Ergebnis als die herkömmlich mittels Vakuum – Technologie Getränkten. Da jedoch eine Woche zwischen den Messungen liegt, können mannigfaltige Einflüsse, wie oben erwähnt, das Messergebnis noch erheblich verfälschen.

*TE-Messungen an Motoretten 2L-Draht Vakuum getränkt, thermisch gealtert*

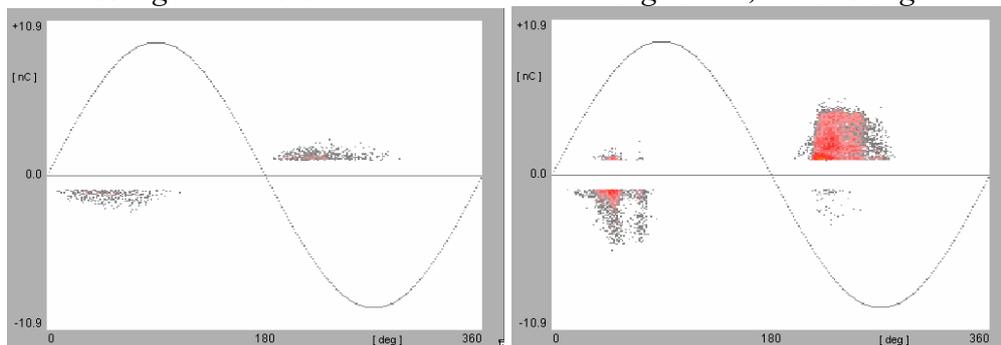


Abbildung 27: links Motoretten VPI; 2,2kV Einsatz gegen Eisen; rechts Motoretten VPI; 3kV gegen Eisen

Im Vergleich zu den oben gezeigten Ergebnissen zeigen die Motoretten nach thermischer Alterung eine Verschlechterung der Isolationswirkung. Da durch thermische Einflüsse sowohl im Tränkarz, als auch in den Isolationsmaterialien Schwachstellen generiert werden, ist ein stärkerer Trend zu Teilentladungen bei niedriger Spannung gegeben.

## 7.9 Zukunftsperspektiven - Silikonharzsysteme

Für Traktionsmotore (Bahn- und Straßenbahnmotoren) werden nach wie vor sehr häufig Harze auf Silikonbasis verwendet, da nur diese den extremen Temperaturen standhalten. Allerdings sinkt die mechanische Stabilität bereits bei Temperaturen ab 120°C extrem stark ab. So sinkt das Elastizitätsmodul, welches die mechanische Festigkeit eines ausgehärteten Polymers charakterisiert, das bei 25°C bei 910 MPa liegt, also mit weicheren Acrylharzen vergleichbar ist, bereits bei 120°C auf 21 MPa, ab 140°C liegt das Elastizitätsmodul um die 10 MPa, von einer ausgeprägten mechanischen Festigkeit kann hier also nicht mehr gesprochen werden. Dies stimmt auch sehr gut mit der Tatsache überein, dass vor allem diejenigen Traktionsmaschinen ausfallen, welche übermäßig starken mechanischen Belastungen (Schwingungen) ausgesetzt sind.

Dennoch ist die Anwendung der Strom UV Technologie auf die Silikonharzimprägnierung ebenso vorteilhaft. Bei der Formulierung des Harzes muss jedoch ein anderer UV Initiator beigemischt werden, als bei den Tränklarzen auf Kohlenstoffbasis.

Bei der Fa. Thumm konnte man mit einem experimentellen Silikonharz der Fa. Wacker (SLM 64067A) einen kleinen Stator mittels Strom UV Technologie tränken. Momentan existiert dieses Harz noch nicht in einer marktfertigen Version, aber von Seiten der Fa. Wacker wird ein fertiges Produkt bis Ende 2005 erwartet.

Der Temperaturverlauf der Tränkung stellt sich wie folgt dar:

10min 150°C Tränken - 50min 170°C Aushärten



Abbildung 28: Mittels Silikonharz getränkter Versuchsstator

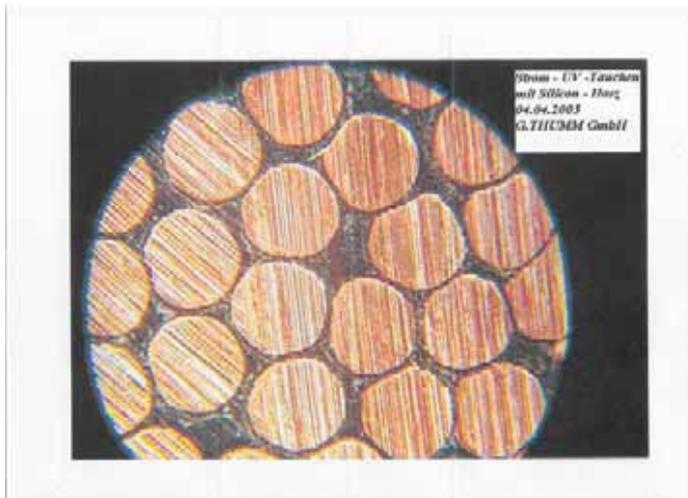


Abbildung 29: stark vergrößertes Schnittbild der Spule



Abbildung 30: Wickelkopf des Silikonharz – getränkten Motors

Die vergrößerte Aufnahme der Spule zeigt die ausgezeichnete Qualität der Imprägnierung, da alle Zwischenräume vollständig ausgefüllt sind.

Auf den Abbildungen ist gut ebenfalls gut zu erkennen, dass der Wickelkopf gut vom Harz durchdrungen wurde, auch ist nur eine schwache Tropfenbildung aufgetreten. Das Blechpaket ist von einer dünnen ausgehärteten Harzschicht überzogen, was eine mechanische Nachbearbeitung überflüssig macht.

Der Einsatz in der Industrie ist momentan noch nicht möglich, da das Isolationssystem und die Harztränkung speziell für die Silikonharztränkung einer Zertifizierung unterworfen sind. („Veridur“ – Isolationssystem) Um diese Zertifizierung auf die Strom UV Technologie zu erweitern, müsste der Trend vorhanden sein, dieses gut funktionierende System zu substituieren.

## 7.10 Zusammenfassung - Niederspannungsrunddrahtwicklung

Bei der Imprägnierung von kleinen Statoren werden die eklatanten Vorzüge der neuen Technologie offensichtlich. Im Vergleich zur VPI-Technologie ist die Aushärtung im Ofen sehr energieaufwendig. Die Energieeffizienz bei einem Ofen liegt nur etwa bei 40%, die restliche eingesetzte Energie zum Aufwärmen des Ofens geht also ungenutzt verloren. Die Effizienz des Stromwärmeverfahrens liegt bei fast 97% bedingt durch das Aufheizen der Maschinen. Eine genauere Betrachtung zur erwarteten Energieeinsparung findet sich im Kapitel „Strom UV-Anlage“

Ein weiterer Unterschied beider Verfahren zeigt sich beim Abtropfverlust. Dieser liegt beim Strom-UV-Verfahren nahezu um einen Faktor 10 niedriger als bei der herkömmlicher VPI-Technologie. Somit werden weniger Ressourcen verschwendet und dieser Effekt kumuliert sich je größer die zu tränkenden Objekte werden. Durch den gezielten Energieeintrag in der Nut geliert das Harz dementsprechend früher, was einen Hauptgrund für den niedrigen Abtropf darstellt. Dadurch bedingt wird mehr Harz in der Nut gehalten, was sich entscheidend auf die Imprägnierqualität und somit auf die Lebensdauer der produzierten Maschinen auswirkt. Zusätzlich ist es auch möglich, die Wicklung während des Tauchens zu wärmen und so bereits im getauchten Zustand eine fortgeschrittene Gelierung zu erreichen, dies stellt jedoch eine stärkere Belastung für das Harz (Alterung) dar. Es kann durch diesen Verfahrensschritt die Harzaufnahme noch weiter gesteigert werden.

Die Differenz zwischen Abtropfverlust und Trockenharzaufnahme entspricht dem Abdampfverlust, der als Emission in die Umwelt gelangt (VOC) und beträgt beim herkömmlichen Verfahren je nach Harzart ca. 10 - 16% und beim Strom-UV-Verfahren nur etwa 1 - 2%.

Auch wird durch die gute Imprägnierqualität eine verbesserte Wärmeleitung in der Nut erzielt, was sich bei entstehenden Temperaturspitzen positiv für die Maschine auswirkt. Genau so positiv wird sich das Verhalten der Maschine im Steady-State Betrieb zeigen.

Für die Erwärmung des Blechpaketes zeigt sich der Vorteil der hochfrequenten Induktion gegenüber der mittelfrequenten Induktion, diese Version der Vorwärmung wird auch in der geplanten Anlage realisiert.

Die dielektrischen Messungen zeigen keine Verbesserung der Werte im Vergleich zur VPI – Technologie. Nach einer thermischen Alterung wurde eine Erhöhung der Teilentladungsaktivität festgestellt.

Die weiteren Tränkversuche mit Dobeckan FT 2015 UV zeigen die erhofften Vorteile auf eine anschauliche Weise, weiters werden durch die alternative Technologie die Emissionen an Vinyltoluol auf unter 2% gesenkt. Eine genaue Betrachtung der zu erwarteten Emissionen wird im Kapitel „Strom UV Anlage“ ausführlich behandelt. Weiters wird durch diese Technologie eine geringere Harzbelastung erwartet, sodass in Zukunft kaum zu reaktives Harz ausgetauscht werden muss, was wiederum eine Einsparung an Ressourcen ermöglicht.

## 8 Technischer Teil - Niederspannungsformspulenwicklung

### 8.1 Dauertemperaturversuche

Bei Niederspannungsgeneratoren in der Leistungsklasse ab 1 bis 2 Megawatt ist die Runddrahttechnologie nicht mehr optimal. Es muss danach getrachtet werden, den Nutzfüllfaktor zu erhöhen und somit Stromverdrängungseffekte zu verringern. Dies hat besonders großen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten des Generators und somit auf die Nutzbarkeit (Faktor Gewicht und Größe des Generators im Verhältnis zur nutzbaren Leistung). Die Lösung für dieses Problem ist die Verwendung von rechteckigem Kupfer, welches die Nutzmöglichkeit ausfüllt, natürlich unter Berücksichtigung der notwendigen Isolationsdicke und einer geeigneten Einbautoleranz.

Die Verwendung von lackisolierten Kupferdrähten würde natürlich nahe liegen. Es gibt jedoch wichtige Gründe warum davon Abstand genommen wird. Lackisoliertes Kupfer ist sehr steif, dies führt dazu, dass die geformten Spulen nur unter sehr großem Kraftaufwand zu richten und in den Stator einzubauen sind. Die Gefahr, die Spulen beim Einbau zu beschädigen ist dadurch sehr groß.

Als sehr geeignet erweist sich blankes Kupfer, welches mit einer Isolationsfolie umwickelt wird. Der erste Vorteil hierbei ist, dass blankes Kupfer weich geglättet werden kann. Bei jeder Umformung des Kupfers (z. B. Umspulen auf eine andere Trommel) steigt dessen Festigkeit wieder an. Beim Aufbringen von mehreren Lagen Isolationsfolien in einem Arbeitsgang braucht das Kupfer jedoch nur einmal umgespult werden, so dass die Weichheit zum großen Teil erhalten bleibt. Weiche Spulen sind leichter zu formen und auch leichter einzubauen. Dies bedingt eine geringere Gefahr von Beschädigungen und eine enorme Zeitersparnis.

Als Isolationsfolien werden Feinglimmerbänder verwendet, wie sie von der Isolation in der Hochspannungstechnologie her bekannt sind. Im speziellen sind dies Bänder, wo auf einer hauchdünnen Polyesterträgerfolie Feinglimmerpapier mit einem sehr geringen Harzanteil, welches sich im B-Stage befindet, als Bindemittel versehen ist. Damit das Feinglimmer nicht direkt am blanken Kupfer zu liegen kommt, werden als unterste Lage sehr dünne Polyesterfolien verwendet. Dies ist sehr wichtig, so dass sich beim Formen des Kupfers die Isolationsfolien besser verschieben können und daher nicht aufplatzen.

Aus Fachkreisen wurde bekannt (\*), dass Feinglimmerbänder bei sehr großen Temperaturen zur Delaminierung neigen, was insbesondere im Hochspannungsbereich zu Glimmladungen führt welche sukzessive die Isolation zerstören. Im Niederspannungsbereich, das ist der Spannungsbereich bis 1000 Volt, sollten derartige Prozesse jedoch keine Rolle spielen, auch wenn in Sonderfällen (Stillstandsspannung und dergleichen) kurzzeitig größere Spannungen auftreten können.

(\* Dr. Heinz Brandes, Fa. vonRoll Isola, CH

(\* DI Bernhard Hafner, Fa. Isovolta, A

Aus diesen Gründen war es unumgänglich einen Beweis für die grundsätzliche Eignung dieses Teilleiter-Isolationssystemes für den genannten Anwendungsbereich zu erhalten. Für diesen Zweck wurde eine größere Anzahl an Spulenmodellen einer erhöhten Temperatur-

belastung über einen längeren Zeitraum ausgesetzt und die Spannungsfestigkeit gemessen (Durchschlagspannung). Die größten Spannungsspitzen treten am Nutausgang auf, so dass auch bei diesen Probestücken eine Nut nachgebildet werden muss, an der das Erdpotential angelegt werden kann. Eine andere Messanordnung wird als wenig sinnvoll erachtet. Dadurch ergibt sich allerdings ein zusätzlicher Einfluss aufgrund der Nutisolation. Die Nutisolation besteht aus einem 3-Schicht-Laminat, dies ist eine beidseitig mit Polyamid-Folie kaschierte Polyesterfolie. Polyamid-Folien haben eine hohe Temperaturbeständigkeit, jedoch eine geringe mechanische Festigkeit. Dies ist der Hauptgrund, wieso für diese Anwendung dieses 3-Schicht-Laminat verwendet wird. Beim Herstellungsprozess (Einbau der Spulen) gewährleistet die Polyesterfolie mechanischen Schutz. (Die Aufkaschierte Polyamid-Folie wird vor Beschädigung geschützt). Bei Temperaturen über 180°C verliert die Polyesterfolie allerdings ihre Spannungsfestigkeit. Diese Schädigung ist irreversibel. Die Isolation ist jedoch so ausgelegt, dass die Spannungsfestigkeit des Polyesters nicht berücksichtigt wird. Dies ist auch der Grund, wieso die Prüfspannung trotz „Zerstörung“ des Polyesters gehalten werden kann. Die Wichtigkeit dieses Versuches liegt nicht nur darin, diesen Sachverhalt zu beweisen, sondern zu zeigen, dass das veränderte Polyester durch partielles Aufschmelzen oder eventuelle Zersetzungsprodukte keine negativen Auswirkungen auf die Isolation haben.

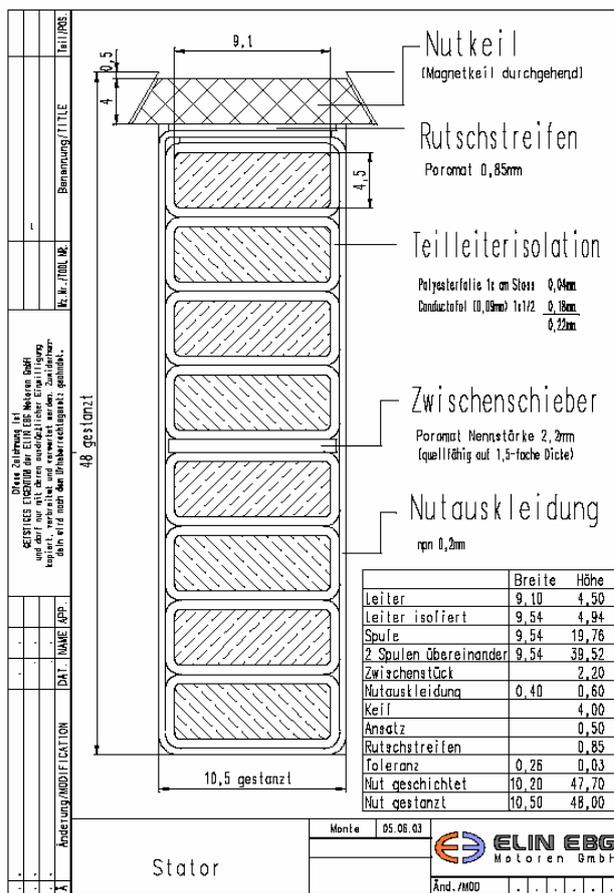


Abbildung 31: Schematischer Isolationaufbau der Formspule



Abbildung 32: Prüfkörper vor der Auslieferung zum Test

Im folgenden Diagramm sind die Ergebnisse der oben im Text beschriebenen Dauertemperaturversuche dargestellt. Die Versuche sind noch nicht Abgeschlossen, es sind noch Werte für 32 Wochen Temperaturbelastung ausständig.

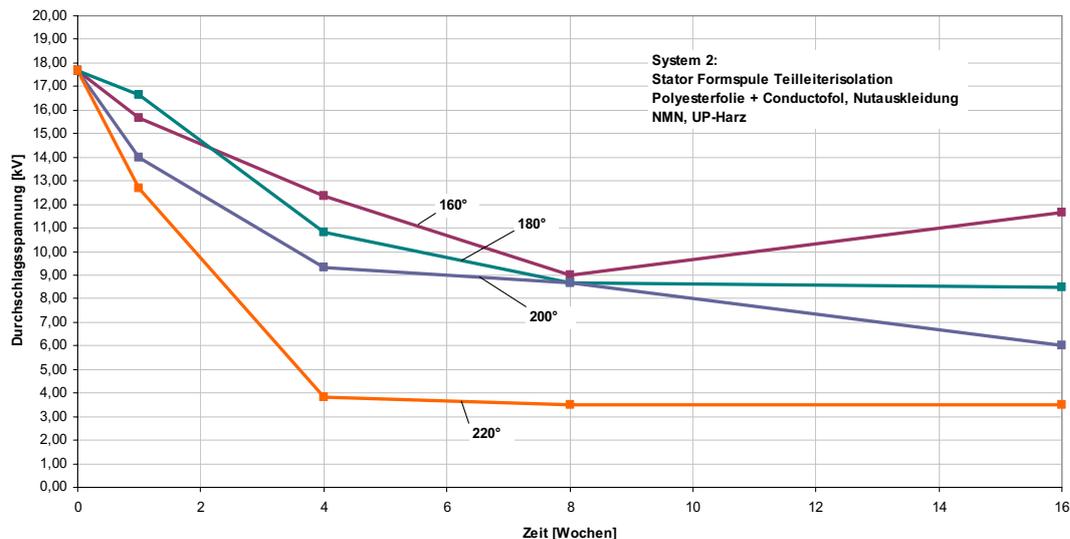


Abbildung 33: Abnahme der Spannungsfestigkeit von Statornutmodellen bei prolongierter Belastung mit Temperatur (Dauertemperaturversuch)

Es kann gezeigt werden, dass, wie erwartet, die recht hohe Spannungsfestigkeit des unbelasteten Systems bei Temperaturen über 180°C rasch abnimmt, die Spannungsfestigkeit jedoch stets über der geforderten Mindestspannungsfestigkeit von 3,0 kV liegt (=Prüfspannung).

Bei einer Temperatur von 220°C nimmt die Spannungsfestigkeit am Anfang sehr rasch ab, bleibt aber dann konstant und liegt immer über der geforderten Prüfspannung von 3,0 kV. Jeder Messpunkt ergibt sich aus den Werten von 3 Durchschlagsprüfungen. Dies ist statistisch gesehen ein recht niedriger Wert für n, die Tendenz ist jedoch eindeutig zu erkennen.

Dieses Bild stimmt sehr gut mit theoretischen Betrachtungen überein: Die in diesem Isolationsystem vorhandene Polyesterfolie verliert, wenn sie über 180°C erhitzt wird, irreversibel ihre Isolationswirkung. Die Nutauskleidung, die für das gesamte Isolationsystem wesentlich ist, besteht aus einem 3-Schicht-Laminat aus beidseitig mit Nomex-Folie kaschierter Polyesterfolie. Auch die Isolationswirkung dieser Polyesterfolie, nimmt bei Erhitzung über 180°C ab.

## **8.2 Spannungsversuche an NS-Formspulen, getränkt mittels Strom-UV-Verfahren**

Niederspannungswicklungen welche als Formspulen ausgeführt sind können auch – so wie HS-Spulen - Einzelprüfungen unterworfen werden, da jede Windung einzeln gefertigt ist und erst nach dem Einbau in den Stator verschalten werden. Runddrahtwicklungen sind nicht in einzelne Spulen auftrennbar und daher auch nicht getrennt prüfbar.

Da jedoch NS-Formspulen bisher kaum untersucht wurden, da diese Technologie erst seit kurzem in der Niederspannungstechnologie angewandt wird, gibt es kaum Vergleichsuntersuchungen oder standardisierte Messmethoden.

Die mit dem Strom-UV-Verfahren getränkten Spulen sind mit einer gleichmäßig dicken Harzschicht umgeben. Die Oberfläche ist sehr regelmäßig. Messtechnisch kann zwischen den unterschiedlichen einzeln getränkten Spulen kaum ein Unterschied festgestellt werden, es gibt auch dazu derzeit noch keine geeignete Methode.

Es ist zu bemerken, dass selbst die Spannungsfestigkeit einer nicht imprägnierten Spule ausreichend ist, allerdings würde aufgrund thermischer Alterung und prolongierten Entladungseffekten wegen der fehlenden Sekundärisolation sowie mechanischen Einflüssen innerhalb kürzester Zeit die Isolationswirkung irreversibel geschädigt wird und eine Fehlfunktion unausweichlich ist. Hauptverantwortlich für die guten Werte für die Spannungsfestigkeit im trockenen Zustand sind die ungealterten Polyesterfolien. Im Betrieb, wenn durch lange Einwirkung von großen Temperaturen die Polyesterfolien ihre Isolationswirkung verlieren, wird die Güte der Sekundärisolation entscheidend sein.

Die Harztränkung trägt also entscheidend zur Temperaturfestigkeit bei.

Bei den folgenden Prüfungen wurde die Durchschlagsspannung gemessen, somit das Isolationsmedium zerstört. Demzufolge werden solche Tests nur an Prüfkörpern durchgeführt.



Abbildung 34: Die Pfeile bezeichnen bei der Niederspannungsformspule die Lage der Isolation der Nutauskleidung



Abbildung 35: Der angeschwärzte Punkt des Durchschlages ist gut zu erkennen. Die Nutauskleidung ist zwar ein wenig zu kurz dimensioniert, die Spannung des Durchschlages liegt aber trotzdem noch über der Prüfspannung



Abbildung 36: typischer Versuchsaufbau zur Ermittlung der Durchschlagsspannung bzw. Teilentladung

## Versuche

	Beginn TE	Spannungsfestigkeit
Nut 1	4 kV	8.5 kV Beginn Überschläge
Nut 2	6 kV	11 kV Überschlag
WiKo	4 kV	5 kV, Durchschlag

*Tabelle 10: Spannungsfestigkeit einer nicht imprägnierte Spule. Die Spannungsfestigkeit ist trotz fehlender Sekundärinsulation sehr hoch. Dies ist hauptsächlich auf die ungealterten Polyesterfolien zurückzuführen. Die Einsatzspannung der Teilentladung ist jedoch deutlich geringer als bei einer imprägnierten Spule. Der Beginn der Einsatzspannung wurde in diesem Fall durch das erste Auftreten eines deutlichen Entladungsgeräusches definiert.*

	Beginn TE	Spannungsfestigkeit
Nut 1	5,5 kV	16 kV, Durchschlag
Nut 2	7 kV	11 kV, Durchschlag
WiKo	7,5 kV	7,5 kV, Durchschlag

*Tabelle 11: Spannungsfestigkeit einer im Strom-UV-Verfahren getränkten Spule. Als Imprägnierharz wurde Herbert E 4011 UV verwendet. Die Spannungsfestigkeit liegt weit über dem geforderten Niveau. Bei prolongierter Alterung nimmt die Spannungsfestigkeit jedoch aufgrund der Degradation der Polyesterfolien stark ab und der Einfluss der Imprägnierung fängt an zu dominieren (siehe Kapitel Dauertemperaturversuche)*

	Beginn TE	Spannungsfestigkeit
Nut 1		3 kV, Durchschlag beim Hochfahren
Nut 2	5 kV	6 kV, Durchschlag
WiKo		6,8 kV, Durchschlag

*Tabelle 12: Spannungsfestigkeit einer im Strom-UV-Verfahren getränkten Spule. Als Imprägnierharz wurde Dobeckan MF 8001 UV verwendet. Bei diesem Versuch war die Nutauskleidung zu kurz. Trotz der falschen Auslegung des Nutmodelles bei dieser Spule und der daher sehr geringen Durchschlagspannung, liegt diese noch immer über der geforderten Prüfspannung*

Diese Ergebnisse bestätigten unsere Erwartungen und waren die Grundlage für die schon zuvor genannten auswärtigen Tränkungen von Versuchsstatoren und schließlich die Tränkung von 6 Windkraftstatoren.

### 8.3 Zusammenfassung – Niederspannungsformspulenwicklung

Bedingt durch den unterschiedlichen Isolationsaufbau bei Formspulen, wo Feinglimmerbänder auf einem Polyesterträgermaterial verwendet werden und diese um die Kupferstangen gewickelt werden, wurde der Einfluss von höheren Temperaturen auf die Isolation untersucht. Auch bei langer und hoher Temperatureinwirkung von Spulen, welche auf herkömmliche Weise hergestellt wurden, konnte noch eine ausreichende Isolationswirkung festgestellt werden. Im Betrieb, wenn durch lange Einwirkung von großen Temperaturen die Polyesterfolien ihre Isolationswirkung verlieren, wird die Güte der Sekundärisolation entscheidend sein. Und diese wird wie etliche Untersuchungen bis jetzt schon belegen, durch die neue Technologie entschieden verbessert.

Weiters besteht somit auch beim Aufheizen der Spulen mittels Stromwärme, wo auch Temperaturspitzen über 150°C auftreten, kaum eine Gefahr der Delaminierung des Polyestermaterials

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass bei mittels Strom UV-Technologie getränkten Formspulen ebenso eine starke Verbesserung der Tränkqualität festgestellt werden konnte. Das monomerfreie Harz Herberts E4011 UV wurde mit dem herkömmlichen Tränkharz verglichen. Prüfungen welche die Durchschlagsspannung messen, ergaben eine Erhöhung der Werte im Vergleich zum VPI-Prozess, was ein weiterer Beweis für die entschieden verbesserte Imprägnierqualität darstellt.

Die Trängung des Versuchstators und der Windkraftstatoren verlief ohne Schwierigkeiten bei der Firma Thumm auf deren Versuchsanlage und diese Maschinen laufen nach wie vor ohne Komplikationen.

## 9 Technischer Teil - Hochspannungsformspulenwicklung

### 9.1 Stromkräfte am Wickelkopf

Die folgenden Daten wurden aus folgender Veröffentlichung der TU Graz entnommen:

Gerfried Maier, Hansjörg Köfler, Johann Bacher: Three-Dimensional Speed-Optimized Force Calculation in End Windings, TU Graz 2004

Bei der Konstruktion einer HS Maschine kommt auf die Auslegung des Wickelkopfes besonderes Augenmerk. Viele Untersuchungen wurden durchgeführt um das am besten passende Design zu finden, wobei die räumliche Ausdehnung, die Kosten bei der Produktion und natürlich auch die Kräfte die am Wickelkopf entstehen könnten, von entscheidender Bedeutung sind.

In diesem Fall wurden die Kräfte mittels des Gesetzes nach Biot Savart abgeschätzt. Jedoch weist dieses System Schwächen auf, wenn komplexe Geometrien oder verschieden permeable Materialien verwendet werden. Somit wurden Vereinfachungen bei der Berechnung vorgenommen um reproduzierbare aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Das Gesetz von Biot Savart verbindet die Stromdichte in einem Volumenteil mit der magnetischen Flussdichte.

$$\vec{B} = \frac{\gamma_0}{4 \cdot \pi} \int_{\Omega} \frac{\vec{J} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \cdot d\Omega$$

$\vec{B}$  ..... Magnetische Flussdichte am Blickpunkt

$\gamma_0$  ..... Magnetische Permeabilität im Vakuum

$\vec{J}$  ..... Stromdichte an der Quelle

$\vec{r}$  ..... Abstandsvektor zwischen Quelle und Blickpunkt

$\Omega$  ..... betrachtetes Volumen

Nach Ableiten der Gleichung nach dem betrachteten Volumen und Einsetzen der Stromfläche  $\vec{\alpha}$  erhält man folgende Gleichung wobei das betrachtete Volumen auf die Fläche A reduziert wurde:

$$\vec{B} = \frac{\gamma_0}{4 \cdot \pi} \int_A \frac{\vec{J} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \cdot dA$$

Um eine schnellere Berechnung der Kräfte zu erhalten, wurde das Integral als Summierung diskreter Areale, in denen der Betrag und die Richtung des Stromes der Stromfläche konstant waren, angenähert. Die Stromfläche  $\vec{\alpha}$  wird durch ein Verschieben der Stromdichten in der Nut und am Wickelkopf in Umfangsrichtung und durch ein Konzentrieren im Zentrum der Spule ermittelt.

An der Grenzfläche zwischen dem ferromagnetischen Eisenpaket und dem Wickelkopf müssen zwei Bedingungen erfüllt sein.

$$B_{n,1} = B_{n,2} (\dots) \quad B_n \dots \dots \dots \text{ Normalkomponente der Flussdichte}$$

$$H_{t,1} = H_{t,2} (\dots) \quad H_t \dots \dots \dots \text{ Tangentialkomponente der magnetischen Erregung}$$

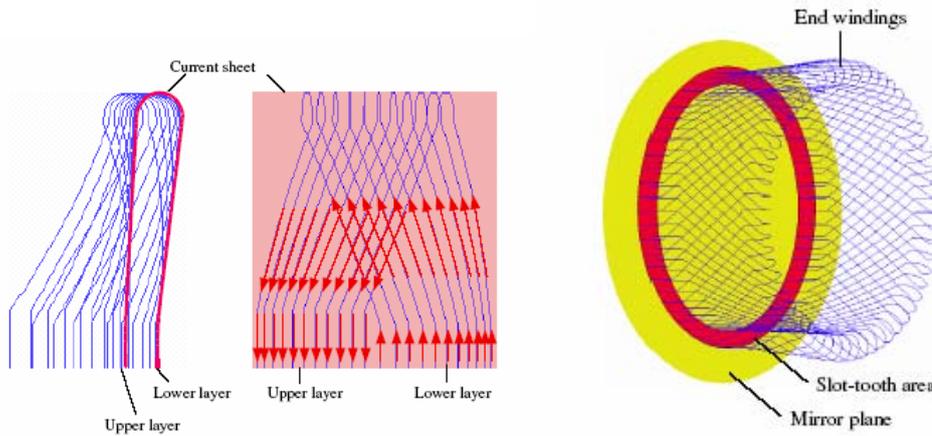


Abbildung 37: Bestimmung der Stromfläche (current sheet) und für die Betrachtung der Stromkräfte interessante Bereiche des Wickelkopfes

Unter Einbindung der Permeabilität erhält man folgenden Zusammenhang:

$$B_{t,1} \cdot \mu_2 = B_{t,2} \cdot \mu_1$$

Diese Gleichung zeigt dass die Tangentialkomponente der Flussdichte B von einem Material null sein muss, wenn das andere Material unendlich permeabel ist. Die Permeabilität des Eisenpakets wurde als unendlich angenommen und somit wurde keine Tangentialkomponente der Flussdichte über dem Blechpaket festgelegt. Dies gilt jedoch nicht für den gesamten Bereich, besonders im Nut – Zahn – Bereich muss eine weitere Feldstärke eingeführt werden. In diesem Bereich rührt die Tangentialkomponente der Flussdichte hauptsächlich – sofern die endliche Permeabilität des Eisens vernachlässigt wird – von einem magnetischen Streufluss aus der Nut, welcher in axialer Richtung abnimmt.

Um diesen Einfluss abzuschätzen wurde eine komplexe Koordinatentransformation durchgeführt, welche der Nut – Zahn – Geometrie angepasst wurde. Folgender Zusammenhang wurde ermittelt:

$$l = k_1 \cdot e^{k_2 \cdot \frac{z}{b_n}}$$

- l..... Verhältnis der Flusslinien zur Nutbreite
- k<sub>1</sub>,k<sub>2</sub>..... Konstanten
- z..... Axiale Koordinate
- b<sub>n</sub> ..... Nutbreite

Um nun das zugehörige Feld in dem Gebiet des Wickelkopfes zu erfassen, wird die Streuflussdichte in der Nut durch obige Gleichung skaliert. Mittels folgender Matrize ist es möglich aus einer idealisierten Nut heraus die magnetische Streuflussdichte zu ermitteln.

$$B_l = \begin{cases} 0 & x < x_1 \\ \mu_0 S_{ul} b_C (x - x_1) \frac{1}{b_n} & x_1 < x < x_2 \\ \mu_0 S_{ul} b_C h_C \frac{1}{b_n} & x_2 < x < x_3 \\ \mu_0 (S_{ul} h_C + S_{ul} (x - x_3)) b_C \frac{1}{b_n} & x_3 < x < x_4 \\ \mu_0 (S_{ul} + S_{ul}) b_C h_C \frac{1}{b_n} & x_4 < x < h_n \end{cases}$$

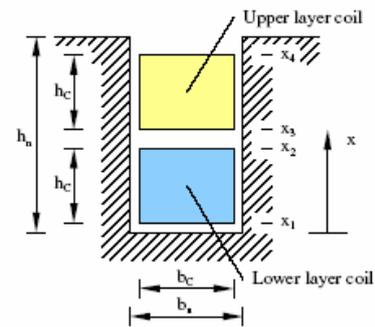


Abbildung 38: Berechnungsmatrize für die magnetische Streuflussdichte und schematische Darstellung des Nutaufbaus

Abkürzungen:

$B_l$  .....magnetische Nutstreuflussdichte

$S_{ul}, S_{ul}$  .....Stromdichte im Oberstab („upper layer“) bzw. im Unterstab („lower layer“)

$b_n$  .....Nutbreite

$b_c$  .....Spulenbreite

$h_n$  .....Nuthöhe

$x$  .....Koordinatenabschnitt beginnend am Nutgrund

Aus der Gleichung nach Lorentz lässt sich dann die Kräfteverteilung ( $\vec{\Delta}F$ ) an einem schmalen Wegstück ( $\vec{\Delta}l$ ) bei bekannter Stromstärke ( $I$ ) ermitteln:

$$\vec{\Delta}F = I \cdot (\vec{\Delta}l \times \vec{B})$$

Die Messungen wurden an einem vierpoligen Wechselstromstator durchgeführt.

## Erläuterung zur Darstellung der Ergebnisse

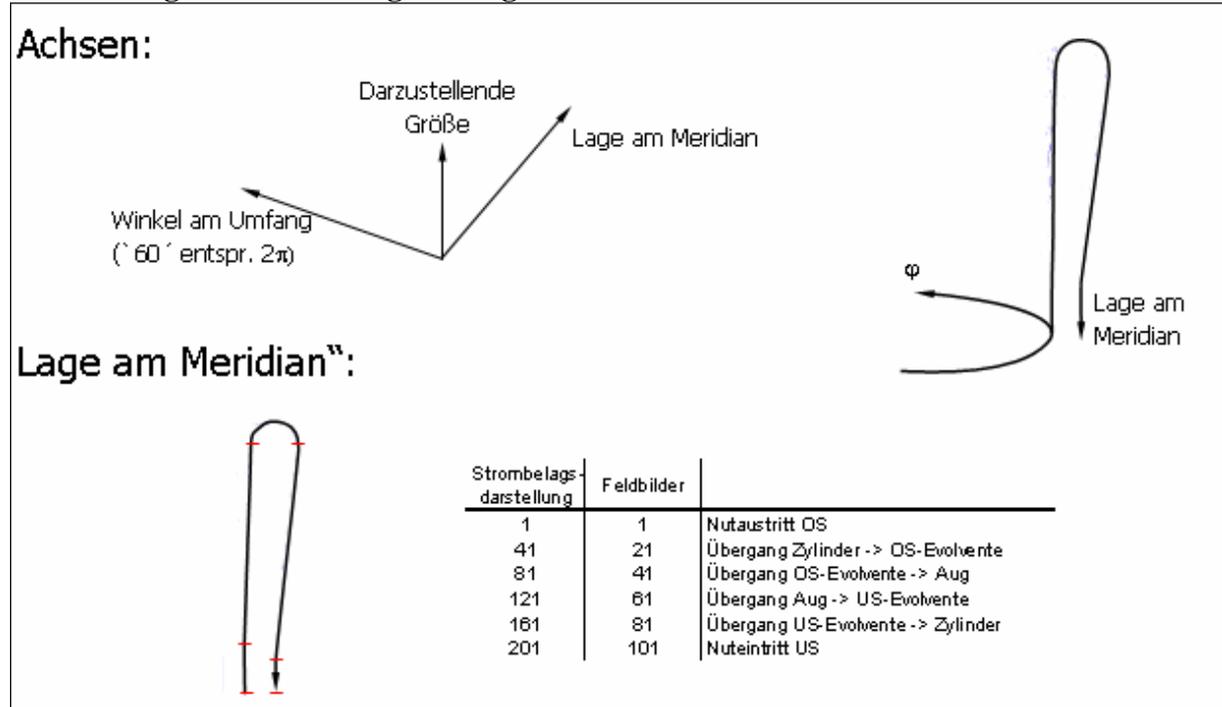


Abbildung 39: Erklärung zu den Ergebnissen aus den Diagrammen

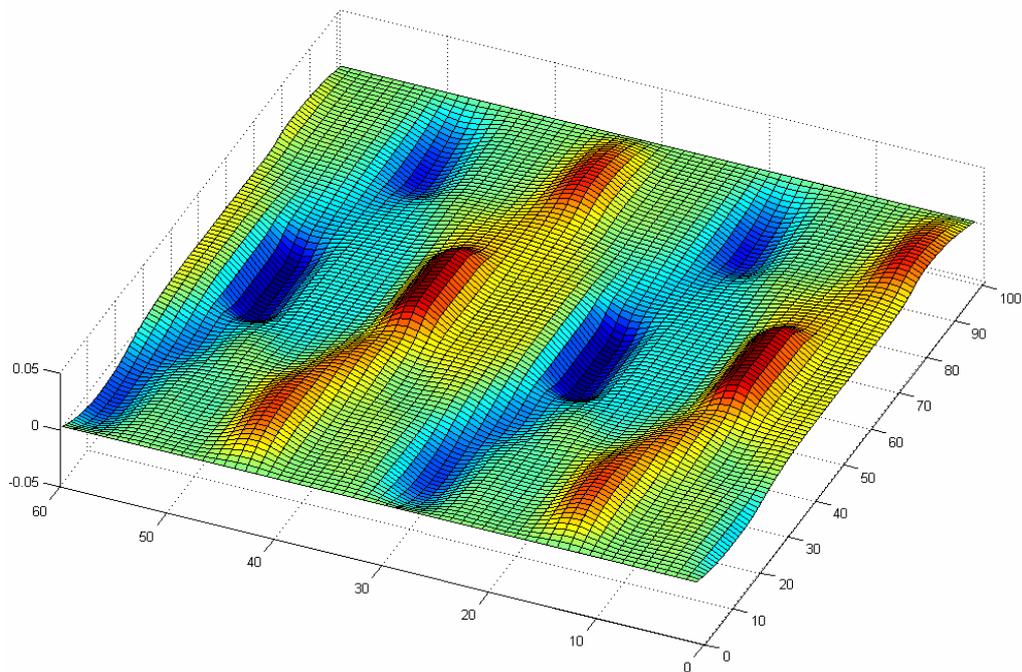


Abbildung 40: tangentielle Flussdichte  $B$ , (gemessen in T) wobei der Streuanteil vernachlässigt wird (keine tangentielle Komponente an der Paketoberfläche)

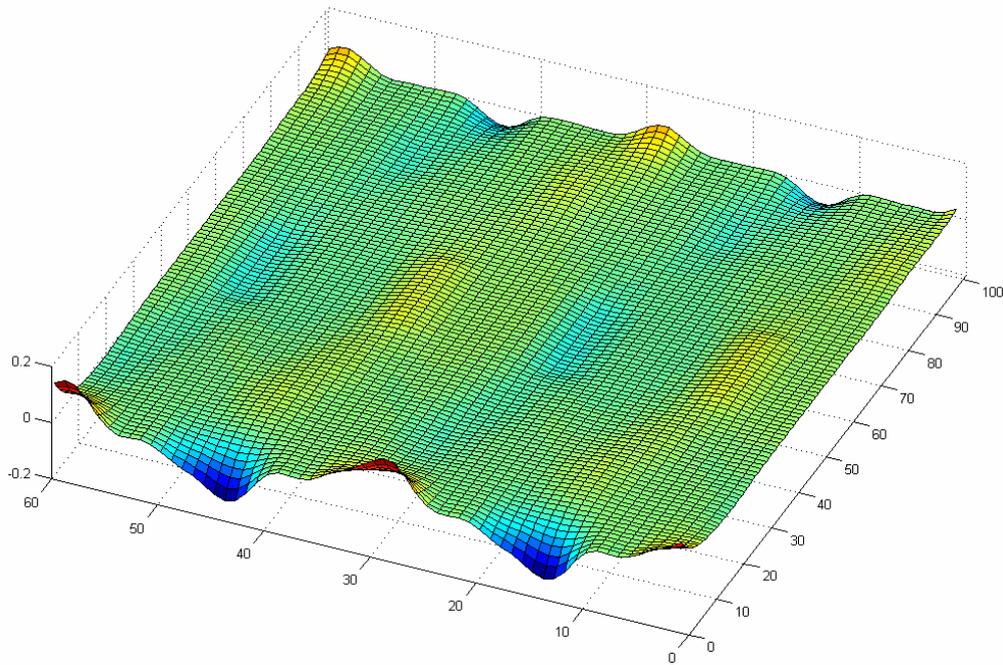


Abbildung 41: tangentielle Flussdichte  $B_t$  (gemessen in T) inklusive Streuanteil

Aus Abbildung ist erkennbar, dass die Streuflussdichte in den Oberstäben größer ist, als in den Unterstäben.

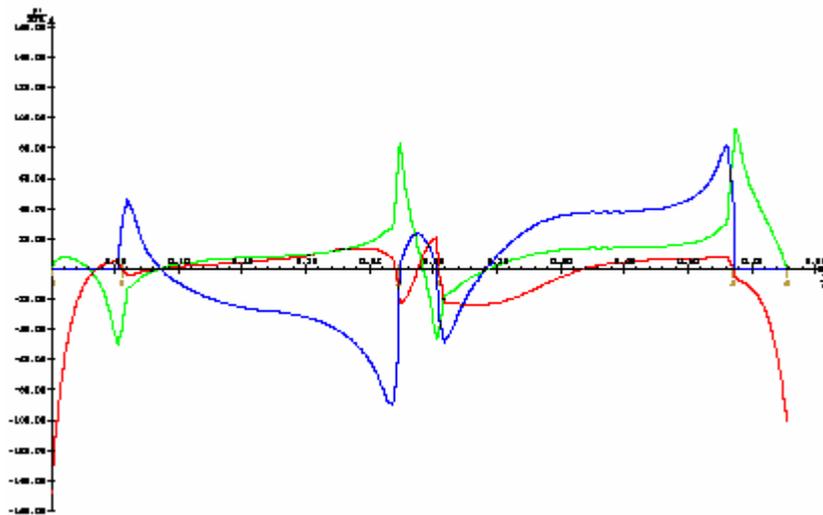


Abbildung 42: radialer (rot), tangentialer (grün) und axialer Anteil der Kraftdichte an der Spule

### 9.1.1 Ergebnis

Nach Interpretation der Untersuchungen zeigt sich, dass ein Vernachlässigen der tangentialen Flussdichte in der Nähe des Eintritts der Spule in das Blechpaket bemerkenswerte Fehler in der Feld- und Kräfteberechnung bewirkt. Die starke radiale Kraft auf die Spulen in der Nähe des Paketes kann nur mit einem speziellen Ansatz gesehen werden.

Somit kann davon ausgegangen werden, dass die in diesem Fall die Stromkräfte keine deformierenden Auswirkungen auf den Wickelkopf haben.

## 9.2 Erwärmung von HS – Spulen durch Stromwärme

### 9.2.1 Erste Versuche

Für die erste Abschätzung der Prozessparameter wurden Spulenmodelle unterschiedlichen Aufbaus mittels Strom UV getränkt. Es wurde ein experimentelles Epoxidharz mit speziellem UV – Initiator verwendet.

Für die ersten Tränkversuche wurden Spulen – Stabmodelle gefertigt und bei *Fa. Gottlob Thumm* getränkt. Nach dem Aushärten wurden die Isolierbänder aufgeschnitten um die Qualität optisch zu beurteilen.

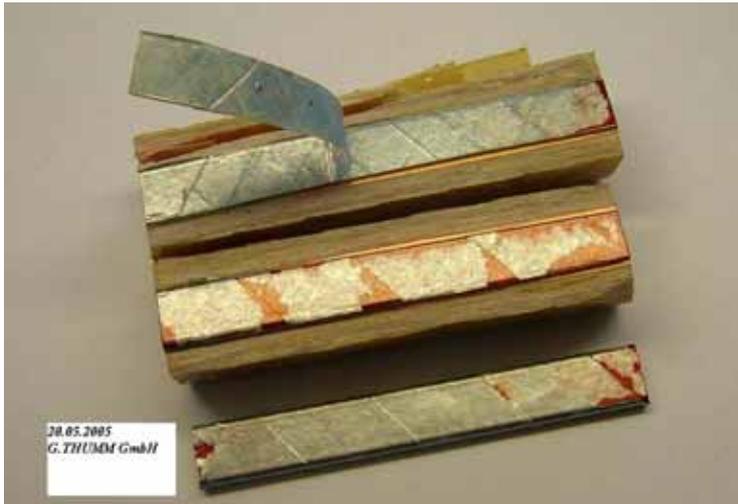


Abbildung 43: Imprägnierqualität der Vorversuche

Wie auf der Abbildung gut zu erkennen ist, ist die Qualität der Trängung in Ordnung, die Verklebung der Teilleiterisolation (Glimmerband) zum Kupfer ist so gut, dass man mittels Abschaben die Schichten nur schwer entfernen konnte. Ebenso ist die Durchträngung der Isolierbänder zufrieden stellend, wobei nicht alle Verwerfungen mit Harz gefüllt werden konnten.

Eigens zur genauen Beobachtung der Erwärmung wurde eine Formspule mit Cr – Ni – Temperaturmessfühlern ausgestattet und ein Erwärmungslauf durchgeführt.

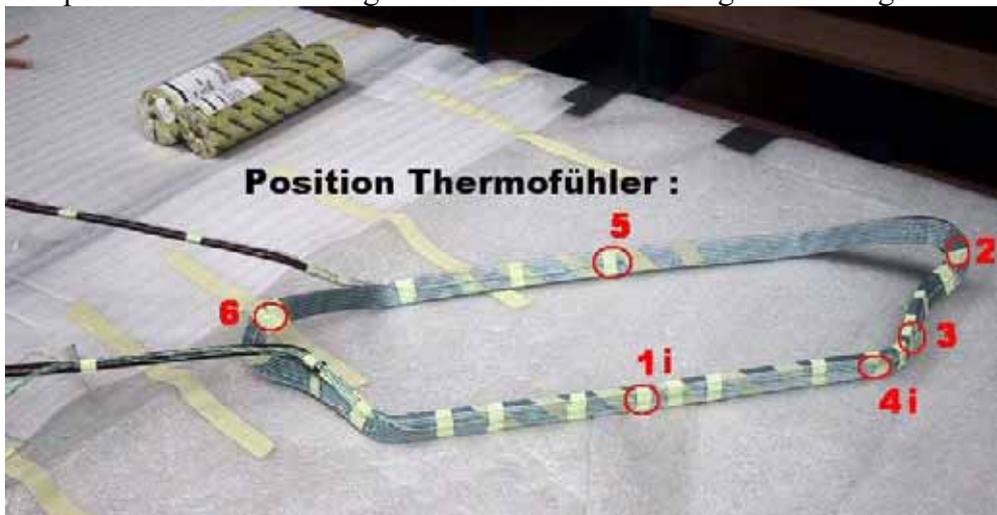


Abbildung 44: Formspule mit der Position der Thermofühler

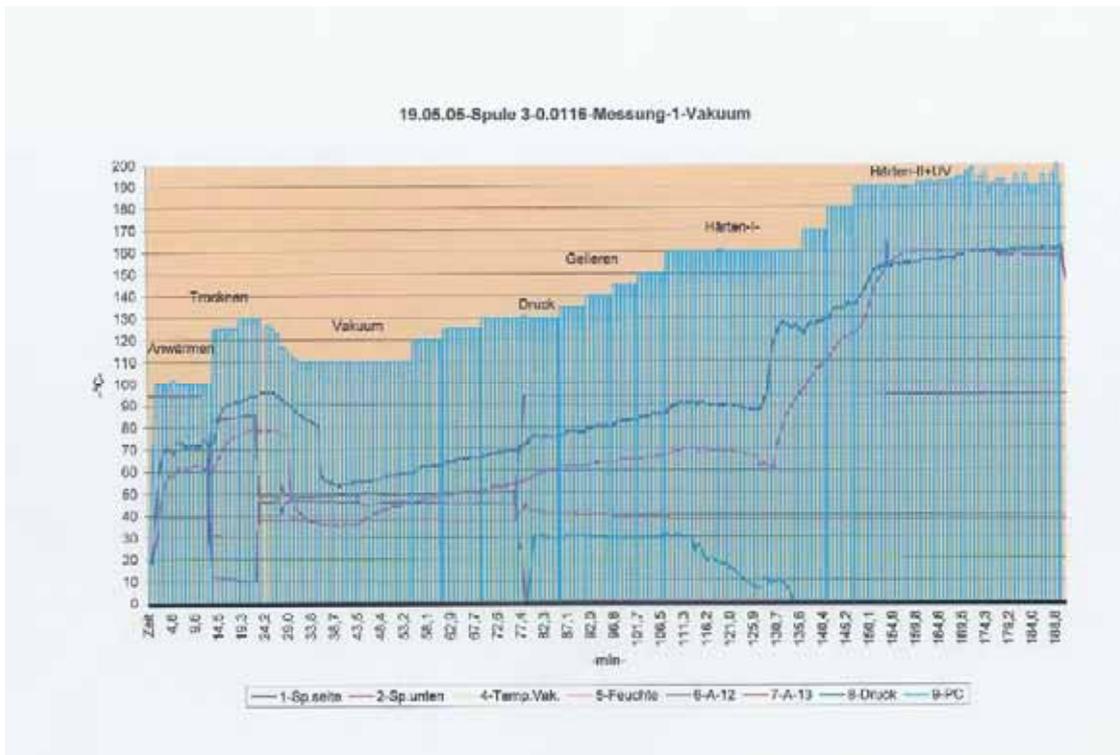


Abbildung 45: kompletter Prozessablauf über 190 Minuten

- 1-Sp.seite.....Thermofühler in der Spule in der Mitte der Nut
- 2-Sp.unten.....Thermofühler in der Spulenkröpfung am unteren Ende
- 4-Temp.Vak.....Thermofühler in der Vakuumabsaugung
- 5-Feuchte.....Feuchte Fühler im Vakuum
- 6-A-12.....Atmosphäre Druck
- 7-A-13.....Unterdruck Vakuum
- 8-Druck .....Überdruck Vakuum
- 9-PC.....Spulentemperatur laut PC – Widerstandsmessung

Im Gegensatz zur Tränkung von Niederspannungsmaschinen ist es bei Hochspannungsmaschinen von sehr großer Bedeutung die vorhandene Feuchtigkeit aus den Bändern zu vertreiben. Der Grund liegt in dem höheren Spannungsgradienten bei diesen Maschinen, deswegen bewirkt Feuchtigkeit einen Durchschlag bei niedrigerer Spannung als bei trockenem Material. Aus diesem Grund wird beim Anwärmen und Trocknen eine Temperatur von 80-90°C in den Windungen angelegt, daraufhin wird eine Vakuumphase etwa eine halbe Stunde lang durchlaufen, um sicherzustellen, dass die Feuchtigkeit entfernt wurde. Weiters dient das Vakuum dazu die Lagen an Isolierbändern zu komprimieren und die eventuell vorhandenen Luftbläschen zu entfernen. Danach wird der Behälter geflutet, die Tränkung durchgeführt und durch die anschließende Druckphase das Harz in das Isolationsmaterial gepresst. Für das Gelieren im Bad wird eine Temperatur von 70-90°C erreicht, die Endhärte erhält das Harz nach dem Aushärten bei etwa 150°C.

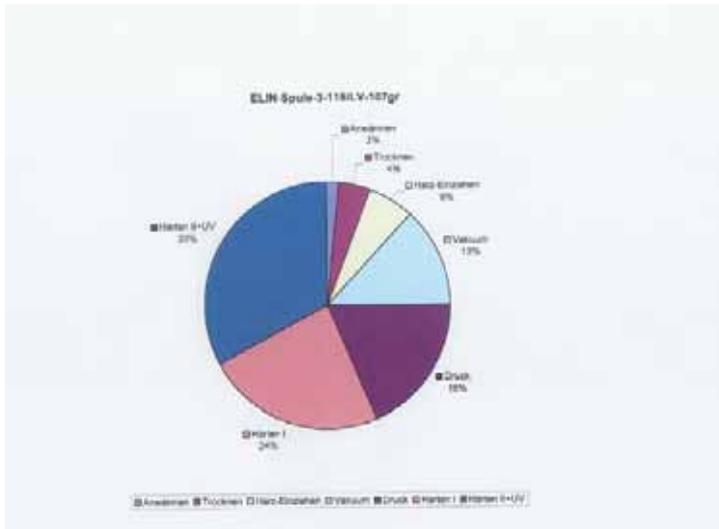


Abbildung 46: Prozentuelle Darstellung des zeitlichen Ablaufes des Tränkprozesses

Die Dauer der Härtephasen sind bei Vergleich mit der Trängung einer NS – Wicklung in etwa gleich, neu dazu sind die Vakuum- und Druckphasen, welche aufgrund des unterschiedlichen Isolationsaufbaus der Hochspannungswicklungen aus der VPI – Technologie übernommen wurden .

### 9.2.2 Weitere Imprägnierversuche mit HS Spulen

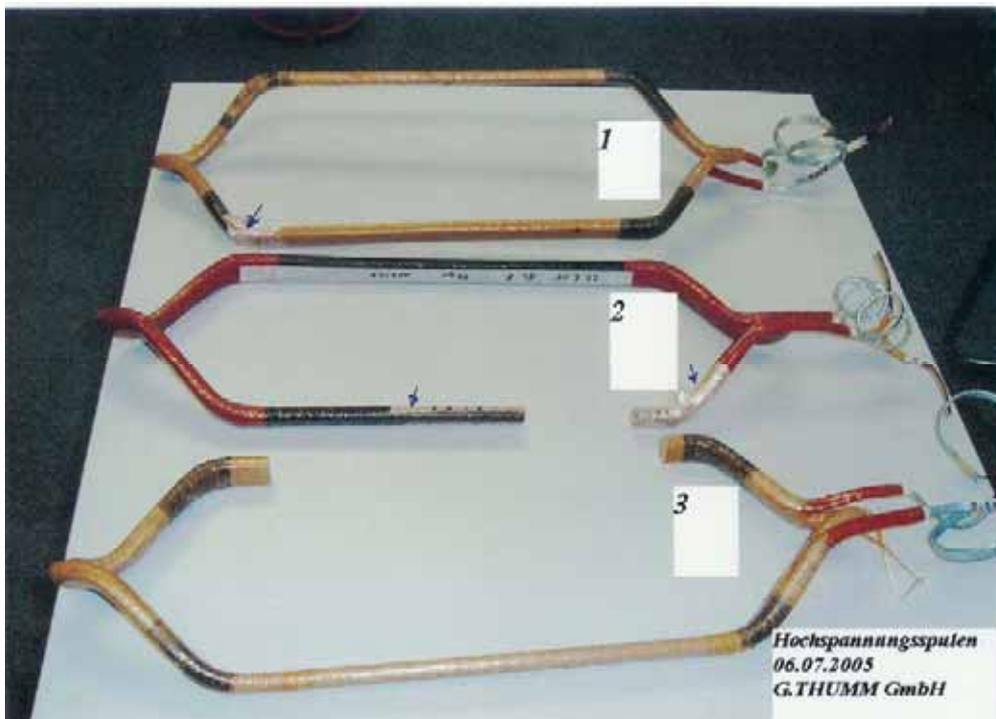


Abbildung 47: Imprägnierversuche mit Hochspannungsspulen, die Pfeile markieren die Stellen, wo nach dem Trängen die Bandagen entfernt wurden (siehe ff. Abschnitte)

Bild 1 zeigt eine Hochspannungsspule mit entferntem Deckband und intaktem Leitvlies

Bild 2 zeigt eine Hochspannungsspule mit allen Bandagen

Bild 3 zeigt eine Hochspannungsspule mit allen entfernten Bändern bis auf die Hauptisolation

### Zu Bild 1:

Vor dem Imprägniervorgang wurden das Isoseal Deckband und das AGS - Leitvlies im Nutteil entfernt. Danach wurde analog zu oben eine Tränkung durchgeführt und das Harz ausgehärtet. Nach optischer Beurteilung konnte festgestellt werden, dass die Tränkqualität an der Hauptisolation zufrieden stellend ist, jedoch das EGS – Vlies nicht ausreichend durchdrungen wurde.



Abbildung 48: Nach dem Härten abgelöstes EGS – Vlies

Auf der Abbildung ist gut zu erkennen, dass nach Entfernung der Bandage diese zwar partiell durchdrungen und ausgehärtet werden konnte, das Vlies dennoch als Schalenteil entfernt werden und somit keine durchgehende Imprägnierung erzielt werden konnte.

### Zu Bild 2:

Diese Spule wurde komplett imprägniert und auch nach optischer Beurteilung wurden äußerlich keine Mängel festgestellt. Nach Abnehmen der gehärteten Bandage wurden ähnliche Mängel wie oben bemerkt.



Abbildung 49: Nach dem Härten abgelöstes Isoseal Deckband

Nach dem Härten konnte die Bandage als Schalenteil abgehoben werden und sowohl Leitvlies als auch Deckband wurden nur partiell durchtränkt und ausgehärtet. Deutlich kann man das schichtweise Eindringen des Harzes entlang der Bandage erkennen, während ein Durchdringen der Bandage durch die erhöhte Viskosität des Harzes und die geringen Porengröße behindert wurde. Eine bessere Qualität wies das abgelöste AGS – Leitvlies auf, dennoch waren noch viele Lufteinschlüsse und vom Harz nicht benetzte Stellen vorhanden.

### Zu Bild 3:

Diese Spule wurde ohne Zusatzbandagen, nur mit der Hauptisolation imprägniert.

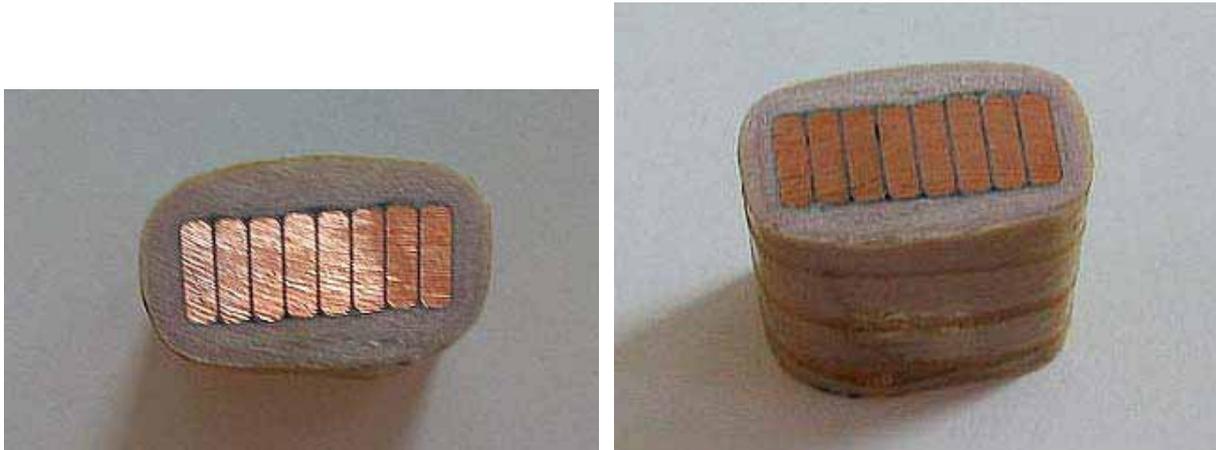


Abbildung 50: Querschnitt der getränkten Hochspannungsspule

Wie auf Abbildung gut zu erkennen ist, konnte bei dieser Tränkung eine ausreichende Durchimprägnierung erzielt werden. Es gibt keine Lufteinschlüsse in der Hauptisolation und die Schichten sind sauber durchtränkt, wobei eine Verbesserung bei der Harzaufnahme noch wünschenswert wäre.

## 9.3 Zusammenfassung – Hochspannungsformspulenwicklung

Die Befürchtungen, dass es aufgrund der hohen elektrischen Ströme, welche zur Erwärmung solch großer Objekte nötig sind, (Akzeptable Aufheizraten liegen bei etwa  $20 \text{ A/mm}^2$  Kupferquerschnitt) starke mechanische Kräfte auftreten könnten, welche die Wicklung als auch die Isolationsmedien zerstören könnten, wurden durch die Studie der TU Graz entkräftet.

Für die weitere Vorgangsweise konnte aus den bisherigen Versuchen festgestellt werden, dass eine Veränderung bei den eingesetzten Materialien notwendig sein wird. Im Vergleich zu Niederspannungsmaschinen ist bei Hochspannungsmaschinen eine viel dickere Hauptisolation nötig um ein Durchschlagen zu verhindern. Genau diese Schichten behindern die Durchlässigkeit der Harze, die ja bei Raumtemperatur eine viel höhere Viskosität besitzen. Bei der VPI- Technologie wird üblicherweise eine höhere Harztemperatur gefahren um eben eine bessere Durchdringbarkeit zu erzielen. Außerdem muss bei den Feinglimmerbändern auf den Beschleuniger verzichtet werden, da dieser die Durchdringbarkeit noch mehr behindert.

Es ist zu erkennen, dass partielle Erfolge bei der Tränkung von Hochspannungsspulen erzielt werden konnten, dennoch ist noch viel Forschungsarbeit in diese Richtung zu leisten.

## 10 Strom UV Anlage

Aufgrund der positiven Ergebnisse aus den angeführten Untersuchungen wird nun die Anschaffung einer Strom UV Anlage angestrebt.

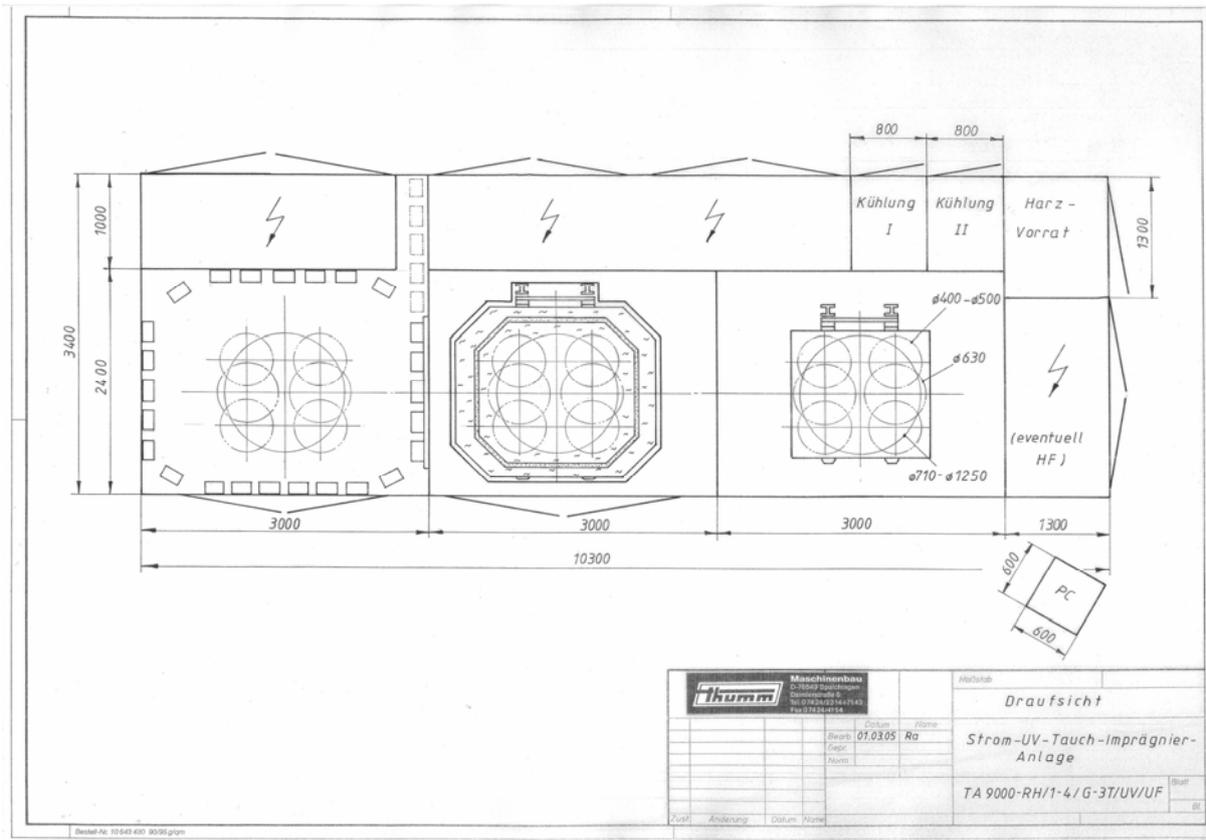


Abbildung 51: Layout der geplanten Strom UV – Anlage

Die Anlage selbst besteht durch ihre modulare Bauweise aus 3 separaten Kabinen, in denen die Prozessschritte durchgeführt werden. Der grobe Ablauf einer Tränkung ist der Folgende:

**Station 1:** Mittels eines Transportwagens wird der Stator in die Anlage eingefahren und die elektrischen Windungen mit der Anlage kontaktiert. Nachdem der Mitarbeiter die Anlage verlassen hat und das Programm aktiviert hat, wird der Stator mittels Gleichstrom auf Tränkttemperatur aufgeheizt. Größere Maschinen mit einem hohen Anteil an Eisen werden zusätzlich mit einer Induktionsschleife vorgeheizt.

**Station 2:** Der Stator fährt in die nächste Station über das Tränkbecken. Das Becken wird hydraulisch angehoben, sodass der Stator vollständig im Becken untergetaucht wird. Durch Kapillareffekte und Viskositätssenkung durch die hohen Temperaturen an der Grenzfläche füllen sich die Zwischenräume mit Harz. Durch die hohen Temperaturen beginnt das Harz in der Windung zu gelieren und der Stator kann wieder aus dem Becken herausgefahren werden.

**Station 3:** Der Stator fährt in die UV-Station, wo das gelierte Tränkharz mittels UV-Licht voll ausgehärtet wird. Nach der Aushärtung wird der Stator wieder in die Station 1 zurückgefahren, vom Mitarbeiter die Kontakte entfernt und der Stator kann fertig imprägniert die Anlage verlassen.

## 10.1 Energieverbrauch

Für die Abschätzung des Energieverbrauchs wurde der Jahresverbrauch an Strom für die VPI Anlage von rund 720.000 kWh für etwa 1000 getränkte Statoren herangezogen. Darin enthalten sind die Energiekosten für 2 Trockenöfen zum Aushärten, die Energiekosten für den Betrieb der Kühlung und Umwälzpumpen für die Vorratsbehälter, sowie für den Tränkbehälter. Für die Energiekosten der Strom UV Anlage wurde aufgrund der vorhandenen Tränkprotokolle von Versuchsstatoren ein Mittelwert von 50 kWh Verbrauch pro Tonne Eisen/Kupfer eines Stators herangezogen. Da die Statoren im Mittel etwa 3t Gewicht besitzen, ergibt sich daraus ein Wert von 150 kWh pro Stator. Für 1000 zu tränkende Statoren ergibt sich ein Energieverbrauch von 150.000 kWh pro Jahr. Für einen Kostensatz von 11,7 Cents pro kWh zeigt die folgende Tabelle die Kosteneinsparung an Energiekosten.

Energieverbrauch	
VPI (kWh/a)	Strom UV (kWh/a)
720.000	150.000
Einsparung	
(kWh/a)	(Euro/a)
570.000	66.690

Tabelle 13: Übersicht über den Stromverbrauch der Strom UV Anlage

Somit kann bei gleich bleibender Auslastung von einer Einsparung von etwa 65.000 Euro ausgegangen werden. Die geplante Anlage soll jedoch im Detail für die 4. Ausschreibung der Initiative „Fabrik der Zukunft“ gesondert als Demonstrationsprojekt behandelt werden.

## 10.2 Angaben zur Emission der geplanten Strom UV Anlage

Allgemeine Leistungsdaten der Strom UV Anlage:

Leistung der Anlage	
(m <sup>3</sup> /h)	(m <sup>3</sup> /a)
3.000,0	24.000.000,0

Tabelle 14: Leistungsdaten der Strom UV-Anlage

Da der Einsatz eines monomerfreien Harzes im Hinblick auf eine weitere Reduktion der Lösemittlemissionen angedacht ist, wird dafür auch der Gesamtkohlenstoffausstoß berechnet.

### 10.2.1 Einsatz eines monomerfreien Harzes – Abschätzung der Emissionen

Dieses Harz auf Acrylatbasis besitzt den Vorteil, dass kaum Lösemittel als Copolymer vorhanden ist und dieses quantitativ in die dreidimensionale Struktur des Harzes eingebaut wird. Somit entstehen keine Emissionen aufgrund von Lösemittel und ein weiterer Vorteil dieses Harzes wäre die Tatsache, dass man ebenso Rotoren mit dieser Anlage tränken könnte. Dieser Sachverhalt wird aber noch im Vorfeld durch Untersuchungen abgeschätzt um die Entscheidung der Harzwahl vor Lieferung der Anlage durchzuführen.

Zur Bestimmung des Gesamtkohlenstoffs in der Abluft der Anlage wird auf den Endbericht des Impulsprojektes E48 von Hrn. Dr. Simbürger verwiesen, wo die Untersuchungen zeigten, dass die in Frage kommenden Harze etwa 5% Emissionen während des Imprägnierungsprozesses aufweisen. Nachfolgende Untersuchungen zeigten sogar, dass nur 1-3% Emissionen in Abhängigkeit vom verwendeten Harz auftraten. Für weitere Berechnungen wurde mit 5% gerechnet um eine ausreichende Sicherheitstoleranz im Betrieb sicherzustellen.

HARZVERBRAUCH (kg/a)	ABDAMPFVERLUSTE 5% Gesamtemission (kg/a)	GESAMTKOHLLENSTOFF (mg/m <sup>3</sup> )
Momentaner Verbrauch 15.000,0	750,0	31
Erwarteter Verbrauch 20.000,0	1.000,0	42
Extremes Szenario 25.000,0	1.250,0	52

Tabelle 15: Gesamtkohlenstoffausstoß der Strom UV-Anlage

Der Gesamtausstoß an Kohlenstoff liegt mit diesen ermittelten Werten deutlich unter den behördlich verordneten 300 mg/m<sup>3</sup>.

### 10.2.2 Einsatz von DOBEKAN FT2015/60EK UV – Abschätzung der Emissionen

Es ist der Einsatz von einem ungesättigten imidgruppenhaltigen Polyesterharz (DOBEKAN FT2015/60EK UV der Fa. Altana Becks) mit 40% Gehalt an Vinyltoluol (VT) ebenso möglich, da bis jetzt mit diesem Harz die beste Tränkqualität erreicht werden konnte.

Zusätzlich zum Ausstoß an Gesamtkohlenstoff, welcher identisch zu den oben ermittelten Werten ist, ist noch die Emission an Vinyltoluol zu berücksichtigen: Laut der Bestätigung des Lieferanten gelangt ein Anteil von 1,7% des im Harz enthaltenen Vinyltoluols als Emission in die Umwelt. Der restliche Anteil bleibt entweder chemisch gebunden in der imprägnierten Maschine oder im abgetropften Harz, welches entsprechend entsorgt wird. Mittels der zuvor angegebenen Abluftleistung der Anlage, läßt sich der Ausstoß an Vinyltoluol wie auf nachstehender Tabelle ersichtlich, ermitteln.

HARZVERBRAUCH (kg/a)	ABDAMPFVERLUSTE (1,7% für VT Harz) (kg/a)	VERLUST an VT (mg/m <sup>3</sup> )
Momentaner Verbrauch 15.000,0	255,0	11
Erwarteter Verbrauch 20.000,0	340,0	14
Extremes Szenario 25.000,0	425,0	18

HARZVERBRAUCH (kg/a)	ABDAMPFVERLUSTE 5% Gesamtemission (kg/a)	GESAMTKOHLLENSTOFF (mg/m <sup>3</sup> )
Momentaner Verbrauch 15.000,0	750,0	31
Erwarteter Verbrauch 20.000,0	1.000,0	42
Extremes Szenario 25.000,0	1.250,0	52

Tabelle 16: Erwartete Emissionen bei Verwendung von Dobeckan FT 2015 UV

Der Gesamtausstoß an Kohlenstoff liegt mit diesen ermittelten Werten deutlich unter den behördlich verordneten 300 mg/m<sup>3</sup>. Auch ist somit ersichtlich, dass die Emissionen bezüglich Lösemittel deutlich unter den vorgeschriebenen 50 mg/m<sup>3</sup> liegen.

# 11 Weitere Vorteile der Strom UV-Technologie

## 11.1 Optische Beurteilung der Tränkqualität

Neben den schon genannten technologischen, umweltschonenden und energetischen Vorteilen, kann man die Verbesserung der Tränkqualität bereits mit dem freien Auge erkennen, wie es die nachstehenden Bilder verdeutlichen.

Die Maschinen auf den Bildern linkerhand sind mit dem herkömmlichen VPI – Prozess getränkt worden, während die Bilder rechts mittels Strom UV Technologie getränkt wurden.



Abbildung 52: getränkter Wickelkopf



Abbildung 53: Tropfenbildung am Wickelkopf nach dem Härteprozess



Bei den Photos links wurde ein sehr reaktives Harz eingesetzt, dementsprechend schlecht ist die Imprägnierqualität, sowohl am Wickelkopf als auch am Blechpaket ist eine Nachbearbeitung unbedingt nötig. Jedoch kann es passieren, dass bei Entfernen des überschüssigen Materials die Isolationsschicht beschädigt wird und man somit Nachimprägnieren muss. Solche Alterungseffekt, welche die Reaktivität des Harzes drastisch anheben können, fallen bei Einsatz der Strom UV Technologie gänzlich weg, da das Harz im Gegensatz zur VPI Technologie nicht vorgeheizt werden muss.

Auf den Photos rechts ist die vollständige Imprägnierung der Spulen gut erkennbar. Auch wurde ein definierter dünner Film abgeschieden, welcher für eine flächendeckende hervorragende Imprägnierqualität sorgt.



Abbildung 54: Tropfenbildung am Nutausgang

Beim Aushärtevorgang entstehen auch am Nutausgang Tropfen, welche im schlimmsten Fall ebenso mechanisch entfernt werden müssen. Da beim herkömmlichen Aushärten im Ofen das Harz vor dem Geliervorgang noch beinahe ungehindert aus der Nut auslaufen kann, ist eine mehr oder weniger starke Tropfenbildung nicht zu verhindern. Beim Strom UV Verfahren härtet das Harz durch die Stromwärme schon partiell in der Nut aus, ohne dass ein starkes Auslaufen aus der Nut und eine damit bedingte Tropfenbildung begünstigt sind.

## 11.2 Einziehen der Pakete ohne Nachbehandlung

Ein weiterer Vorteil der Strom UV Technologie besteht in der Einsparung der Nachbearbeitung der getränkten Objekte. Bisher mussten nach dem VPI Prozess der Paketrücken und die Innenseiten der Maschinen von ausgehärteten Harzresten gereinigt werden. Die Arbeit am noch heißen Objekt war für die Mitarbeiter unangenehm, auch kamen sie wieder in Kontakt mit Dämpfen und die mechanisch abgeschliffenen Harzreste waren eine Belastung für sowohl die Haut als auch die Atemwege.

Durch den Einsatz der neuen Technologie kann auf die Nachbearbeitung gänzlich verzichtet werden. Der Grund dafür ist das Auftreten des so genannten „Wascheffektes“.

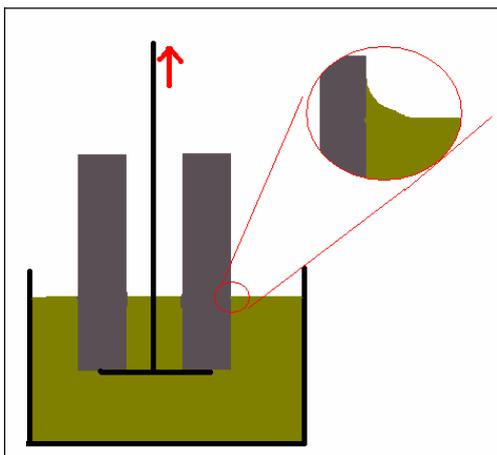


Abbildung 55: Schematische Darstellung des Wascheffektes. Beim langsamen Herausfahren aus dem Tränkbehälter wird das Harz aufgrund des Wascheffektes von den Metallteilen abgezogen

Beim Ausfahren des Objektes nach der Tränkung wird bei entsprechend langsamer Hebe-  
geschwindigkeit die Ausbildung eines stabilen Harzfilmes an der Oberfläche begünstigt. Dieser  
hält aufgrund der Oberflächenspannung zusammen und zieht den Grossteil an Harz von den  
kühleren Stellen des Paketes ab. Die geringen anhaftenden Reste werden in der nachfolgenden  
UV – Kammer ausgehärtet. Somit ist eine Nachbearbeitung nicht mehr nötig, wenn der  
Wascheffekt ausreichend war.

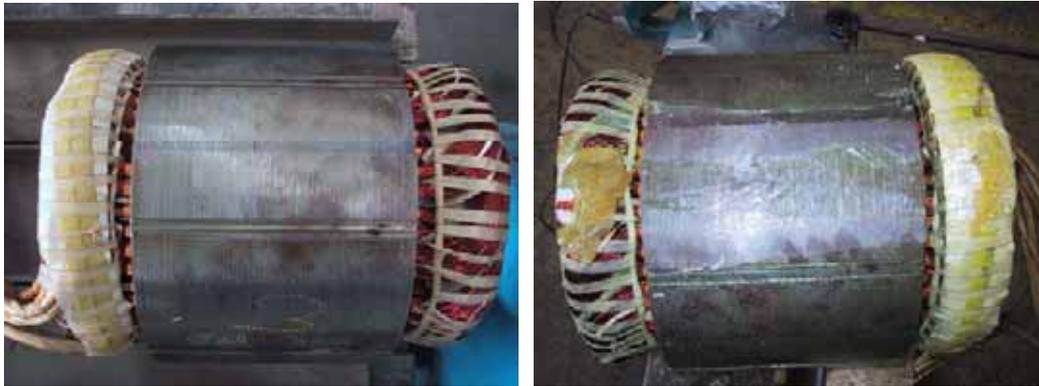


Abbildung 56: Vergleich zwischen Statoren getränkt mit Strom UV Technologie (links) und getränkt mit VPI (rechts)

Deutlich ist auf den Abbildungen am Paketrücken die unterschiedliche Tränkqualität zu er-  
kennen. Links ist keine Nachbearbeitung nötig, rechts muss der Paketrücken mechanisch ge-  
reinigt werden um anschließend das Gehäuse aufschumpfen zu können.

## 12 Conclusio

Zusammenfassend lässt sich folgende Aussage treffen:

Die Strom UV-Technologie stellt nicht nur eine Substitution der Technologie dar, sondern bringt auch etliche Vorteile bezüglich Qualität der Imprägnierung, Wirtschaftlichkeit und Emissionen der Anlage.

Bezugnehmend auf die eingangs erwähnten Ziele können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden.

### 1) Tränkung von großen Statoren in Runddraht- und Flachdrahtausführung

→ Ziel: Überprüfen ob die neue Technologie für alle in Frage kommenden Konstruktionen geeignet ist.

→ Ergebnis: Aufgrund der komplexen elektrischen und mechanischen Verhältnisse wurden umfangreiche theoretische Untersuchungen an der TU Graz durchgeführt, welche als Fundament für die Betrachtung dieser Technologie dienen.

Es wurden insgesamt (neben mehreren kleineren Statoren) 6 große Windkraftstatoren (Leistung 900 kW, Statorgewicht ca. 1,5 t, Durchmesser 710 mm) auf einer von der Fa. Thumm dafür errichteten Versuchsanlage mittels Strom-UV-Verfahren getränkt. Die ausführlichen elektrischen Untersuchungen haben schließlich gezeigt, dass das Strom-UV-Verfahren für die die Objekte, welche man zu tränken beabsichtigt, grundsätzlich geeignet ist.

Ein großer Formspulenstator wurde indes noch nicht imprägniert, da dafür die Versuchsanlage zu klein dimensioniert ist und eine Aufrüstung finanziell nicht machbar erschien. Die theoretischen und technischen Vorarbeiten (Tränkversuche an Spulen) sind jedoch soweit abgeschlossen, dass man für diese Art der Niederspannungsstatoren keine Probleme erwartet.

### 2) Tränkung großer Statoren mit verschiedenen Harzen und ausführliche elektrische Untersuchungen an diesen Statoren.

→ Ziel: Auswahl des geeigneten Harzes für das Strom-UV-Verfahren.

→ Ergebnis: Die beschriebenen Versuchstränkungen mit der Strom-UV-Anlage wurden mit verschiedenen Harzen durchgeführt. Dabei sind für das Verfahren selbst prinzipiell alle getesteten Harze geeignet. Als besonders geeignete Reaktionsharze für die geplante Strom UV-Anlage erscheinen folgende:

→Dobackan MF8004 UV

→Herberts E4011 UV

→Dobackan FT2015 UV

Es wird der Einsatz von Dobackan FT2015 UV geplant, da dieses Harz aufgrund der Untersuchungen die besten mechanischen und chemischen Eigenschaften aufweist. Die Einsatzpalette umfasst neben dem Einsatz für Niederspannungsrunddrahtspulen auch den Einsatz für Niederspannungsformspulen. Durch Differenzwägung konnte eine Zunahme der Harzaufnahme

von etwa 40-60% auf bis zu 90% nachgewiesen werden, was eine eklatante Qualitätsverbesserung der Imprägnierung mit sich bringt. Durch diesen Umstand wird die Wärmeleitung in der Nut verbessert und durch weniger eingeschlossene Luftbläschen im Isolationsmedium werden Teilentladungen und funkenerosive Abtragungsprozesse weniger häufig auftreten. Weiters untermauern Ergebnisse von Harzuntersuchungen im Zuge des Impulsprojektes Impulsprojektes „Einsatz umweltfreundlicher Imprägnierharze im Elektromaschinenbau“ (Projektstart 2000, Proj.Nr. TEC E48) diese Annahme aus bereits genannten Gründen. Somit kann die Harzauswahl soweit als abgeschlossen betrachtet werden, wobei weitere Entwicklungen auf diesem Sektor trotzdem Achtung geschenkt werden soll.

### 3) Tränkung von Hochspannungsmaschinen mittels Stromwärmeverfahren

→ Ziel: Tränkung eines Prototyps

→ Ergebnis: Es wurde ein Prototyp gefertigt, welcher derzeit bei der Firma *Thumm* gelagert ist, jedoch noch nicht getränkt wurde. Bezüglich Hochspannungsspulen gibt es noch einige Problemstellungen, welche abgeklärt werden müssen. Es wurde von der Jury bei Projekteröffnung festgelegt, dass die Projektinhalte bevorzugt auf den Windkraftbereich in Runddrahtausführung zu konzentrieren sind, da eine umfassende und vollständige Betrachtung des Hochspannungsbereiches den Projektrahmen bei weitem gesprengt hätte. Daher wurde dieser Punkt als Grundlagenforschung betrachtet und kann bezüglich dieses geänderten Blickwinkels ebenfalls als zu 70 % erfüllt betrachtet werden.

Einige Fragestellungen bezüglich Imprägnierung von HS-Spulen konnten beantwortet werden, es sind aber noch einige Fragen offen. Der bereits gefertigte und bei der Fa. *Thumm* befindliche Prototyp soll erst nach weiteren Erkenntnissen durch Tränkversuche an HS-Probespulen imprägniert werden.

### 4) Planung und Errichtung einer Strom-UV-Anlage im Werk Weiz auf Grundlage der Ergebnisse der technischen Untersuchungen.

→ Ziel: Minimierter Emission, enorm verminderter Energieverbrauch, gesteigerte Wirtschaftlichkeit, gesteigerte Tränkqualität (Verbesserung der Umrichtertauglichkeit, Erhöhung der Lebensdauer der Maschinen), kontrollierte gleich bleibende Tränkqualität, größerer Durchsatz und Arbeitsschutz.

→ Ergebnis: Das Ziel kann als voll erreicht betrachtet werden. Es soll im Zuge der 4. Ausschreibung Fabrik der Zukunft, im Sinne des Mottos „Errichtung eines Leuchtturmes“ eine Strom-UV-Anlage als Demonstrationsprojekt errichtet werden, welche oben genannte Ziele umsetzen soll. Einige wichtige Themen werden in (internen) Folgeprojekten einer weiteren Betrachtung unterzogen (z.B. Untersuchung auf Umrichtertauglichkeit, Temperaturverhalten, mechanische Festigkeit der Wickelköpfe, etc.).

Weitere zusammengefasste Punkte:

Die zu erwartende Energieeinsparung beim Vergleich zwischen VPI und Strom – UV Technologie liegt bei etwa 500.000 kWh bei gleich bleibender Auslastung. Dies ist durch den gezielten Energieeintrag in die zu tränkenden Maschinen und einen Verzicht auf eine veraltete Methode zum Vorwärmen und Aushärten der Tränkeobjekte zu erreichen. Das Vorwärmen mittels einer Hochfrequenz – Induktionsschleife kann unter enormer Zeitersparnis und effizientem Wirkungsgrad vorgenommen werden.

Die Harzverluste durch Abdampfung, Abtropfen und als Emissionen werden aufgrund der innovativen Technologie auf unter 5% gesenkt. Vor allem die Emissionen werden weit unter die gesetzlichen Vorgaben und VOC – Richtlinien abgesenkt. Weiters wird eine Harzbelastung weitgehend ausgeschaltet, da ein Aufheizen auf höhere Tränktemperaturen nicht mehr nötig ist, sodass es zu weniger Entsorgen von Altharz kommen wird.

Die dielektrischen Messungen zeigen ebenso eine Verbesserung der Werte im Vergleich zur VPI – Technologie, was ein mögliches Potential bei der Einsparung an der Stärke der Hauptisolation mit sich bringt.

Bei Einsatz von Formspulen wurde der Temperatureinfluss auf das Isolationsmaterial untersucht, somit besteht auch beim Aufheizen der Spulen mittels Stromwärme, wo auch Temperaturspitzen über 150°C auftreten, keine Gefahr der Zerstörung des Isolationsmaterials.

Die Tränkung des Versuchsstators und der 6 Windkraftstatoren verlief ohne Schwierigkeiten bei der Firma Thumm auf deren Versuchsanlage und diese Maschinen laufen nach wie vor ohne Komplikationen.

Die Befürchtungen, dass es aufgrund der hohen elektrischen Ströme, welche zur Erwärmung solch großer Objekte nötig sind, (Akzeptable Aufheizraten liegen bei etwa 20 A/mm<sup>2</sup> Kupferquerschnitt) starke mechanische Kräfte auftreten könnten, welche die Wicklung als auch die Isolationsmedien zerstören könnten, wurden durch die Studie der TU Graz entkräftet.

Für die weitere Vorgangsweise konnte aus den bisherigen Versuchen festgestellt werden, dass eine Veränderung bei den eingesetzten Materialien notwendig sein wird. Im Vergleich zu Niederspannungsmaschinen ist bei Hochspannungsmaschinen eine viel dickere Hauptisolation nötig um ein Durchschlagen zu verhindern. Genau diese Schichten behindern die Durchlässigkeit der Harze, die ja bei Raumtemperatur eine viel höhere Viskosität besitzen. Bei der VPI- Technologie wird üblicherweise eine höhere Harztemperatur gefahren um eben eine bessere Durchdringbarkeit zu erzielen. Außerdem muss bei den Feinglimmerbändern auf den Beschleuniger verzichtet werden, da dieser die Durchdringbarkeit noch mehr behindert.

Es ist zu erkennen, dass partielle Erfolge bei der Tränkung von Hochspannungsspulen erzielt werden konnten, dennoch ist noch viel Forschungsarbeit in diese Richtung zu leisten.

Abschließend ist zu sagen, dass die Ergebnisse aus diesem Forschungsprojekt zum Kauf einer Strom – UV Anlage mehr als berechtigen, da die technologischen Anforderungen für unsere Einsatzzwecke mehr als ausreichen. Die weiteren Versuche betreff Hochspannungsspulen können weiters direkt vor Ort im Zuge von fortführenden Forschungsprojekten durchgeführt werden.

## 13 LITERATURLISTE

- 1 Impulsprojekt „Einsatz umweltfreundlicher Imprägnierharze im Elektromaschinenbau“ (Projektstart 2000, Proj.Nr. TEC E48)
- 2 BTM consult APS; Bericht über die Entwicklungen am Windmarkt (März 2004)
- 3 Gerfried Maier, Hansjörg Köfler, Johann Bacher: Three-Dimensional Speed-Optimized Force Calculation in End Windings, TU Graz 2004
- 4 „Endurance testing of impregnating varnishes and resin possibilities? Limits?“, Insucon 2002, H. Conrad, S. 233
- 5 “Vergleichende Beurteilung von Tränkmitteln in Elektroisoliersystemen”, 11. Fachtagung Elektroisoliersysteme 2004, Dr. DI techn H. Simbürger

## 14 Abbildungsverzeichnis

Name	Seite
Abbildung 1: Versuchstränkanlage bei der Firma Gottlob Thumm GmbH in Deutschland. Ein Stator eines Windgenerators wird zur Tränkung vorbereitet.	9
Abbildung 2: Dielektrische Messung zweier vergleichbarer Wicklungen, welche mittels zweier verschiedener Verfahren getränkt wurden. Für das VPI-Verfahren wurden ein UP-Harz mit Vinyltoluol verwendet, für das Strom-UV-Verfahren ein UP-Harz mit Acrylaten	11
Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Hochspannungsspule ab 6kV Betriebsspannung, genaue Beschreibung im Text.	22
Abbildung 4 : Schematischer Aufbau eines Windgenerators	28
Abbildung 5 : Matrix – Generatoren	29
Abbildung 6 : Marktanteile der Hauptwettbewerber am Windkraftsektor	30
Abbildung 7 : Jährliche Entwicklung der Windkraft mit Aufschlüsselung der offshore – Parks	30
Abbildung 8 : Aufschlüsselung der Entwicklung am Windmarkt nach Kontinenten	31
Abbildung 9 : Übersicht der installierten MW der Hauptwettbewerber am Windsektor	31
Abbildung 10 : Rissbildung durch Schrumpfung und Aushärtung bei extrem hoher Temperatur(250°C)	36
Abbildung 11: Ein in dicker Schicht ausgehärtetes Polymer welches ein ungünstigen Schrumpfungsverhalten zeigt kann zu Spannungsbrüchen neigen (links: optimal ausgehärtetes Harz, mitte: mehrere Makrorisse über das ausgehärtete Material verteilt, rechts: ein großer Spannungsbruch)	36
Abbildung 12: Schrumpfung von Probekörpern (Länge 40mm, Dicke 2mm) bei einer Aushärtetemperatur von 170°C. Dobeckan FT2015 (UP – Harz) zeigt den geringsten Schrumpf neben den Epoxid- und Acrylatharzen	36
Abbildung 13: TMA Plot des Harzes Dobeckan FT 2015 (J1). Zu erkennen sind die drei linearen Bereiche der Wärmeausdehnung. Bei den meisten anderen Duromeren sind in diesem Temperaturbereich nur zwei lineare Bereiche zu erkennen	38
Abbildung 14 : Verlauf der Viskosität verschiedener UP-Harze in Abhängigkeit von der Temperatur.	40
Abbildung 15 : Abtropfverhalten zweier Tränkarze (Dobeckan FT 2015, Herberts E4011/129) 10 min nach dem der Stator aus dem Harzbecken gehoben wurde. In den ersten 10 Minuten tropft vor allem das außen anhaftende überschüssige Harz ab, dieser Abtropf liegt bei ca. 0.8 – 0.9 kg. Beim herkömmlichen Verfahren vergehen ein bis zwei Stunden bis das Objekt die Gelierungstemperatur erreicht, bis dahin kann das Harz auch wieder relativ leicht aus der Maschine auslaufen, da die großen Hohlräume zwischen den Kupferbündeln das Harz schlecht zurückhalten.	45
Abbildung 16: Temperaturverlauf am Wickelkopf und in der Nut beim Strom-UV-Verfahren (Trockenlauf). Von 6 Wickelkopfthermometern zeigte einer eine stärker Temperaturabweichung zu geringeren Temperaturen, sodass der Mittelwert leicht unterhalb der PC-Einstellung liegt, die anderen 5 Wickelkopfthermometer liegen sehr nahe am eingestellten Wert.	46
Abbildung 17: Umwickeln des Stators mit einer Glasfasermatte und den Glühkabeln, schematische Temperaturverteilung	48
Abbildung 18: Temperaturverlauf von 36 Pt-100 beim Tränkungsvorgang mit Stromwärme.	49
Abbildung 19: Übersicht über die Temperaturverteilung am Blechpaket	49
Abbildung 20: Abweichungen bei der Erwärmung eines Stators während des Tränkvorganges beim Strom-UV-Verfahren.	50
Abbildung 21: Erwärmung eines Stators im Prüffeld, gut zu erkennen ist dass nach 5 Stunden der Generator sich im Steady-State befindet. Es ist ebenfalls gut erkennbar, dass die Temperatur im Nutbereich und am Blechpaket geringer sind als im Wickelkopf.	51
Abbildung 23: Diese Kurve zeigt die hohen Spannungsspitzen an einem Umrichter	55
Abbildung 24: Visualisierung einer Teilentladung mittels UV Licht	56
Abbildung 25: links Motoretten mit VPI 2,5 kV gegen Eisen, rechts Motoretten mit VPI 3,2kV gegen Eisen	57

Abbildung 26: links Motoretten Strom-UV, 2,3kV gegen Eisen, rechts Motoretten Strom-UV, 3,1kV gegen Eisen	57
Abbildung 27: links Motoretten VPI; 2,2kV Einsatz gegen Eisen; rechts Motoretten VPI; 3kV gegen Eisen	57
Abbildung 28: Mittels Silikonharz getränkter Versuchsstator	58
Abbildung 29: stark vergrößertes Schnittbild der Spule	59
Abbildung 30: Wickelkopf des Silikonharz – getränkten Motors	59
Abbildung 31: Schematischer Isolationsaufbau der Formspule	62
Abbildung 32: Prüfkörper vor der Auslieferung zum Test	63
Abbildung 33: Abnahme der Spannungsfestigkeit von Statornutmodellen bei prolongierter Belastung mit Temperatur (Dauertemperaturversuch)	63
Abbildung 34: Die Pfeile bezeichnen bei der Niederspannungsformspule die Lage der Isolation der Nutauskleidung	65
Abbildung 35: Der angeschwärzte Punkt des Durchschlages ist gut zu erkennen. Die Nutauskleidung ist zwar ein wenig zu kurz dimensioniert, die Spannung des Durchschlages liegt aber trotzdem noch über der Prüfspannung	65
Abbildung 36: typischer Versuchsaufbau zur Ermittlung der Durchschlagsspannung bzw. Teilentladung	65
Abbildung 37: Bestimmung der Stromfläche (current sheet) und für die Betrachtung der Stromkräfte interessante Bereiche des Wickelkopfes	69
Abbildung 38: Berechnungsmatrize für die magnetische Streuflussdichte und schematische Darstellung des Nutaufbaus	70
Abbildung 39: Erklärung zu den Ergebnissen aus den Diagrammen	71
Abbildung 40: tangentielle Flussdichte $B_t$ (gemessen in T) wobei der Streuanteil vernachlässigt wird (keine tangentielle Komponente an der Paketoberfläche)	71
Abbildung 41: tangentielle Flussdichte $B_t$ (gemessen in T) inklusive Streuanteil	72
Abbildung 42: radialer (rot), tangentialer (grün) und axialer Anteil der Kraftdichte an der Spule	72
Abbildung 43: Imprägnierqualität der Vorversuche	73
Abbildung 44: Formspule mit der Position der Thermofühler	73
Abbildung 45: kompletter Prozessablauf über 190 Minuten	74
Abbildung 46: Prozentuelle Darstellung des zeitlichen Ablaufes des Tränkprozesses	75
Abbildung 47: Imprägnierversuche mit Hochspannungsspulen, die Pfeile markieren die Stellen, wo nach dem Tränken die Bandagen entfernt wurden (siehe ff. Abschnitte)	75
Abbildung 48: Nach dem Härten abgelöstes EGS – Vlies	76
Abbildung 49: Nach dem Härten abgelöstes Isoseal Deckband	76
Abbildung 50: Querschnitt der getränkten Hochspannungsspule	77
Abbildung 51: Layout der geplanten Strom UV – Anlage	78
Abbildung 52: getränkter Wickelkopf	81
Abbildung 53: Tropfenbildung am Wickelkopf nach dem Härteprozess	81
Abbildung 54: Tropfenbildung am Nutausgang	82
Abbildung 55: Schematische Darstellung des Wascheffektes. Beim langsamen Herausfahren aus dem Tränkbehälter wird das Harz aufgrund des Wascheffektes von den Metallteilen abgezogen	82
Abbildung 56: Vergleich zwischen Statoren getränkt mit Strom UV Technologie (links) und getränkt mit VPI (rechts)	83

## 15 Tabellenverzeichnis

Name	Seite
Tabelle 1: Temperaturen [in °C] aus den Erwärmungsläufen von Maschinen mit einer Leistung von 37 kW. Pt-100 Nr.1-3: Temperaturfühler im Wickelkopf auf der Antriebsseite (AS) (=Anschlussseite); Pt-100 Nr.4-6: Temperaturfühler im Wickelkopf auf der Bürstenseite (BS), Nut-Pt-100: Temperaturfühler 5 cm in einer Nut am Nutgrund; weiters sind die Temperaturen der Raumumgebung und des Gehäuses angegeben.	9
Tabelle 2: Vergleich der Eigenschaften verschiedener chemischer Familien von Harzen.	35
Tabelle 3: E-Modul, maximale Festigkeit $R_m$ und Dehnung $\epsilon$ bei Bruch der Probe, gemessen mittels statischer 3-Punkt-Biegeprüfung mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min und einer Stützweite von 45 mm. Die gehärteten Proben hatten eine Geometrie von $D \times B = 3 \times 5$ mm	37
Tabelle 4: Glasübergangspunkte $T_g$ verschiedener Polyesterimidharze in °C, gemessen an verschiedenen Messgeräten. Die DMA-Untersuchungen auf der TU-Wien wurden mit anderen Proben-geometrien durchgeführt. Als auf der TU-Graz	37
Tabelle 5: Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha$ für den jeweils gültigen Temperaturbereich der Probe gemessen mittels TMA. Im Vergleich: $\alpha(\text{Kupfer}) = 18 \mu\text{m/mK}$ , $\alpha(\text{Eisen}) = 12 \mu\text{m/mK}$ .	38
Tabelle 6: Harzaufnahme (in Kilogramm) von Statoren mit einer Leistung von 37 kW (Durchmesser 315 mm, je ca. 82 kg), sowie Abtropf- und Abdampfverlust. Der Abdampfverlust bei den mittels Strom-UV-Verfahren getränkten Statoren wurde geschätzt, da es nicht möglich war die Nassharzaufnahme zu bestimmen, die Werte liegen aber selbst bei pessimistischer Schätzung weit unter den Werten der herkömmlichen Tränktechnologie (ca. 1 – 2 % der Nassharzaufnahme).	43
Tabelle 7: Temperaturen [in °C] aus den Erwärmungsläufen von Maschinen mit einer Leistung von 37 kW. Pt-100 Nr.1-3: Temperaturfühler im Wickelkopf auf der Antriebsseite (AS) (=Anschlussseite); Pt-100 Nr.4-6: Temperaturfühler im Wickelkopf auf der Bürstenseite (BS), Nut-Pt-100: Temperaturfühler 5 cm in einer Nut am Nutgrund; weiters sind die Temperaturen der Raumumgebung und des Gehäuses angegeben.	46
Tabelle 8: Übersicht eines Strom-UV Prozesses	49
Tabelle 9: Übersicht der verschiedenen Tränkarten zur Harzaufnahme bei Statoren mit 315mm Durchmesser, 370mm Länge und 80kg Gewicht	53
Tabelle 10: Spannungsfestigkeit einer nicht imprägnierte Spule. Die Spannungsfestigkeit ist trotz fehlender Sekundärisolierung sehr hoch. Dies ist hauptsächlich auf die ungealterten Polyesterfolien zurückzuführen. Die Einsatzspannung der Teilentladung ist jedoch deutlich geringer als bei einer imprägnierten Spule. Der Beginn der Einsatzspannung wurde in diesem Fall durch das erste Auftreten eines deutlichen Entladungsgeräusches definiert.	66
Tabelle 11: Spannungsfestigkeit einer im Strom-UV-Verfahren getränkten Spule. Als Imprägnierharz wurde Herbert E 4011 UV verwendet. Die Spannungsfestigkeit liegt weit über dem geforderten Niveau. Bei prolongierter Alterung nimmt die Spannungsfestigkeit jedoch aufgrund der Degradation der Polyesterfolien stark ab und der Einfluss der Imprägnierung fängt an zu dominieren (siehe Kapitel Dauertemperaturversuche)	66
Tabelle 12: Spannungsfestigkeit einer im Strom-UV-Verfahren getränkten Spule. Als Imprägnierharz wurde Dobeckan MF 8001 UV verwendet. Bei diesem Versuch war die Nutauskleidung zu kurz. Trotz der falschen Auslegung des Nutmodelles bei dieser Spule und der daher sehr geringen Durchschlagspannung, liegt diese noch immer über der geforderten Prüfspannung	
Tabelle 13: Übersicht über den Stromverbrauch der Strom UV Anlage	79
Tabelle 14: Leistungsdaten der Strom UV-Anlage	79
Tabelle 15: Gesamtkohlenstoffausstoß der Strom UV-Anlage	80
Tabelle 16: Erwartete Emissionen bei Verwendung von Dobeckan FT 2015 UV	80