

## **Schlussbericht**

zum Teilvorhaben

### **Filterdrosseln – Konzepte und Funktionsmuster** (Förderkennzeichen: 03EE2005C)

im Verbundprojekt

#### **Hocheffiziente Umrichterkonzepte mit Niederspannungs-Leistungshalbleitern für Windenergieanlagen – WindUmEta**

*Projektlaufzeit: 01.04.2019 – 30.06.2022*

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Ansprechpartner:

**Herr Dr. Daniel Benner**  
(Projektleiter)

Tel.: +49 7771 9300-248  
([daniel.benner@sts-trafo.de](mailto:daniel.benner@sts-trafo.de))

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

---

## Inhalt

1. Kurze Darstellung des Projektes.....	3
1.1 Aufgabenstellung.....	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
2. Eingehende Darstellung.....	7
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	7
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	21
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	22
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	22
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	23
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	23

## 1. Kurze Darstellung des Projektes

### 1.1 Aufgabenstellung

#### Gesamtziel des Vorhabens

Windenergieanlagen sind mit Spannungszwischenkreis-Umrichtern ausgerüstet, über die die gesamte Leistung der Windenergieanlage fließt (Vollumrichter, Typ IV Anlagen). Generator- und netzseitig kommen IGBT-Zweipunkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter zum Einsatz, häufig mit einer Nennzwischenkreisspannung von 1100 V und 1,7 kV IGBT. Um die Oberschwingungsanforderungen aus den Gridcodes einhalten zu können, befindet sich netzseitig zwischen Umrichter und Transformator ein Netzfilter, häufig als LCL-Filter ausgeführt. Um die Filterdrossel nicht zu groß werden zu lassen, wird der netzseitige Umrichter mit relativ hohen Schaltfrequenzen von 2,5 bis 3 kHz betrieben. Wenn der Umrichter im Turmfuß angeordnet ist, befindet sich generatorseitig zwischen dem Umrichter und den Turmkabeln ein du/dt-Filter, welches die Spannungssteilheiten der Schaltflanken reduziert und damit Spannungsüberhöhungen am Generator durch Reflexion vermeidet.

Der Umrichter besteht also aus dem generatorseitigen du/dt-Filter, dem generatorseitigen Gleichrichter, dem netzseitigen Wechselrichter und dem netzseitigen Sinusfilter (Abbildung 1). Die Umrichter erlauben generatorseitig den Betrieb des Generators im Arbeitspunkt höchster Leistungsdichte, sie ermöglichen die aktive Dämpfung von Antriebsstrangpendelungen, netzseitig erlauben sie die beliebige Bereitstellung von Blindleistung und garantieren ein Gridcodekonformes Fault-Ride-Through Verhalten, ohne dass es zu hohen mechanischen Lasten kommt. Aus diesem Grund sind Umrichter aus modernen Windenergieanlagen nicht mehr wegzudenken.

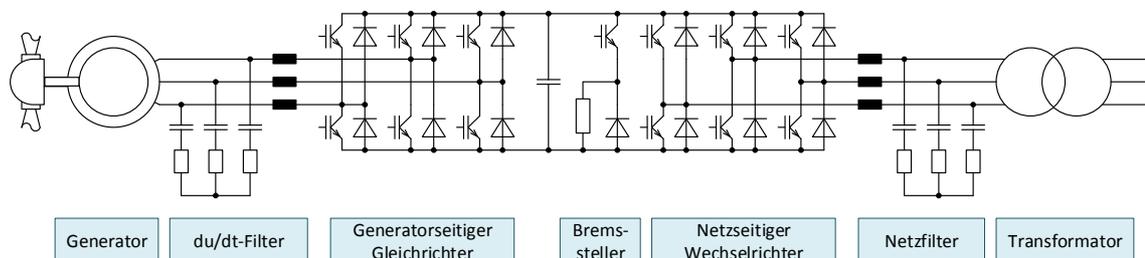


Abbildung 1: Vollumrichter einer Typ IV Windenergieanlage – Stand der Technik mit 1700 V Silizium IGBT als Leistungshalbleiter (Quelle: Uni Rostock)

Allerdings fallen in allen Umrichterkomponenten auch Verluste an – im Nennpunkt in einer Größenordnung von 4 %. In Deutschland wurden im Jahr 2020 rund 131 TWh elektrischer Energie durch Windenergie erzeugt. Wenn alle Windenergieanlagen mit Vollumrichter ausgestattet wären, würden rund 5,2 TWh erzeugter elektrischer Energie im Umrichter in Wärme umgesetzt – die elektrische Energie, die ein großes Kohlekraftwerk pro Jahr erzeugt.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung wurden Umrichter vor allem unter dem Gesichtspunkt geringer Herstellkosten bei Beachtung der Anforderungen an Zuverlässigkeit und Lebensdauer entwickelt. Der Wirkungsgrad spielte eine untergeordnete Rolle. Gleichzeitig setzt sich das Verfahren der Ausschreibungen weltweit mehr und mehr durch, weshalb der er-

reichbare Ertrag einer Windenergieanlage in Abhängigkeit der Herstellkosten immer weiter in den Vordergrund rückt. Aufgrund des wachsenden Anteils umrichterbasierter Erzeugungseinheiten aus regenerativen Energien, werden zudem Systemdienstleistungen über die Wirkleistungseinspeisung hinaus immer relevanter (z. B. Blindleistungsbereitstellung, Speicheranwendungen, Power to X). Auch hier spielt die Umwandlungseffizienz eine stetig wachsende Rolle.

Im Zuge dieses Vorhabens wurden deshalb Stromrichterinnovationen erforscht, die den Wirkungsgrad verbessern ohne dabei die Kostenziele zu sehr zu verletzen. Wegen des hohen Anteils an Teillastbetriebsstunden wurde ein besonderer Augenmerk auf den Teillastwirkungsgrad gelegt.

### Aufgaben und Ziele des Teilverhabens

Im Teilverhaben von STS wurden schwerpunktmäßig folgende Themenbereiche bearbeitet:

- Auslegung von Prototypen für Drosseln hoher Leistung für Stromrichter mit unterschiedlicher Schaltfrequenz und Stufenzahl
- Erforschung parasitärer Eigenschaften und frequenzabhängiger Verluste verschiedener Drosseln und deren Darstellung in Ersatzschaltbildern
- Erforschung der Entwärmung hochkompakter Drosseln
- Erforschung Effekte zweiter Ordnung wie z. B. mechanische Schwingungen und Geräuschbildung

### *1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde*

Die Firma STS ist ein deutsches mittelständisches Unternehmen mit einer 45-jährigen Firmentradition. Firmensitz und Produktionsstandort ist Stockach am Bodensee. Der Erfolg basiert auf dem konsequenten Auf- und Ausbau von Expertenwissen, welches systematisch in den definierten Marktsegmenten angewendet wird. STS versteht sich als Mittelfrequenz-Spezialist für die Entwicklung und Produktion innovativer Produkte mit den Schwerpunkten Engineering und Optimierung. Es werden ausschließlich kundenspezifische induktive Bauelemente für vielfältige Anwendungen gefertigt. Dies sind in der Regel Transformatoren und Drosseln im Mittelfrequenzbereich (bis 1 MHz) mit besonderen Anforderungen. Es werden Leistungen bis 1 MVA, Ströme bis 10 kA und Spannungen bis 60 kV beherrscht.

STS konzentriert sich auf die Produktion von Kleinserien bis hin zu Serien mit mittleren Stückzahlen (ca. 5.000 Stück/Jahr). Die ausgeprägte technologische Ausrichtung des Unternehmens lässt sich u. a. daran erkennen, dass typischerweise ca. 10 % der Mitarbeiter im Bereich F&E tätig sind.

Das Unternehmen hat sich auf Produkte der Leistungselektronik mit besonders hoher Leistungsdichte, Hochspannungs- und Hochstromanwendungen mit ausgeprägtem tech-

nischen Fertigungs-Know-how spezialisiert. STS hat in den letzten 10 Jahren in den Bereichen der industriellen Technik, der Medizintechnik, der Bahntechnik und der erneuerbaren Energien eine hohe Kompetenz entwickelt.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt „WindUmEta“ wurde im Zeitraum vom 01.04.2019 bis zum 30.06.2022 in enger Zusammenarbeit der Partner ENERCON, Universität Rostock und STS durchgeführt.

Die Aufgaben wurden zwischen den beteiligten Projektpartnern wie folgt aufgeteilt:

- WRD als Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft des führenden deutschen Herstellers von Windenergieanlagen ENERCON gab die applikationsspezifischen Randbedingungen vor, bewertete die Kostenpositionen der zu untersuchenden Konzepte und realisierte Funktionsmuster, um die Fertigbarkeit der unterschiedlichen Topologien und Aufbautechniken zu evaluieren.
- An der Universität Rostock wurden verschiedene Umrichterkonzepte zunächst analytisch und simulativ untersucht. Besonders erfolgversprechende Topologien wurden dann im Modellmaßstab realisiert, um so die Steuerung und Regelung bereits frühzeitig erproben zu können.
- STS erforschte die notwendigen Filter- und Entkopplungsdrosseln für die verschiedenen Konzepte, deren Kosten, Bauvolumen, Verluste und Kühlungsanforderungen die Umrichter stark beeinflussen werden.

Das Konsortium umfasste damit alle erforderlichen Kompetenzen von der Konzepterforschung über die Realisierung von Funktionsmustern bis zu einer späteren Produktentwicklung und -fertigung.

Das Verbundprojekt sollte ursprünglich zum 31.03.2022 abgeschlossen werden. Aufgrund der großen technischen Herausforderungen sowie Verzögerungen bedingt durch die Corona-Pandemie wurde das Teilvorhaben von STS um 3 Monate und die Teilvorhaben von WRD und Uni Rostock um 12 Monate verlängert.

### 1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Ausgangssituation wurde bereits unter Pos. 1.1 Aufgabenstellung dargestellt.

### *1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen*

STS konnte alle notwendigen wiss.-techn. Kompetenzen im Projekt gut abbilden, so dass eine weitergehende aktive Kooperation über den Rahmen des Konsortiums hinaus nicht erforderlich gewesen ist. STS verfügt über ein gutes Netzwerk zu Hochschulen und einschlägigen Verbänden, über welches regelmäßig (im Rahmen der vertraglichen Geheimhaltungsregelungen) neue Erkenntnisse ausgetauscht und befruchtende Ideen aufgegriffen werden.

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Teilprojekt der Firma STS umfasste die Mitarbeit im AP 3 und 6.

#### Arbeitspaket 3: Funktionsmuster Umrichtereinheit

Für die Umrichter-Parallelschaltung wurden von der Uni Rostock zunächst verschiedene Topologien untersucht. Zur Ermittlung der parasitären Elemente der Ersatzschaltbilder und der frequenzabhängigen Verluste der verschiedenen Drosselkonzepte wurden die verschiedenen Topologien (FC, ANPC-FC und MMC) von STS in LtSpice auf- und nachgebaut, um verschiedene Simulationen durchführen zu können. Damit der Einfluss auf die Drosseln exakt ermittelt werden konnte, war eine detailgetreue Arbeit notwendig.

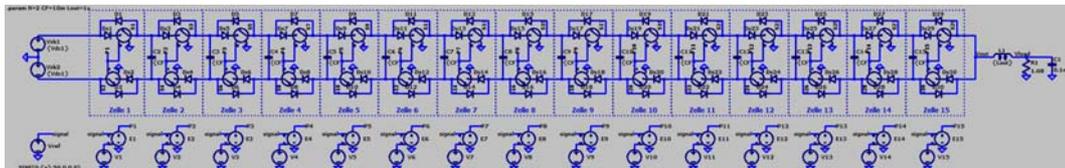


Abbildung 2: Aufbau einer FC-Topologie in LtSpice samt Regelungskreisen

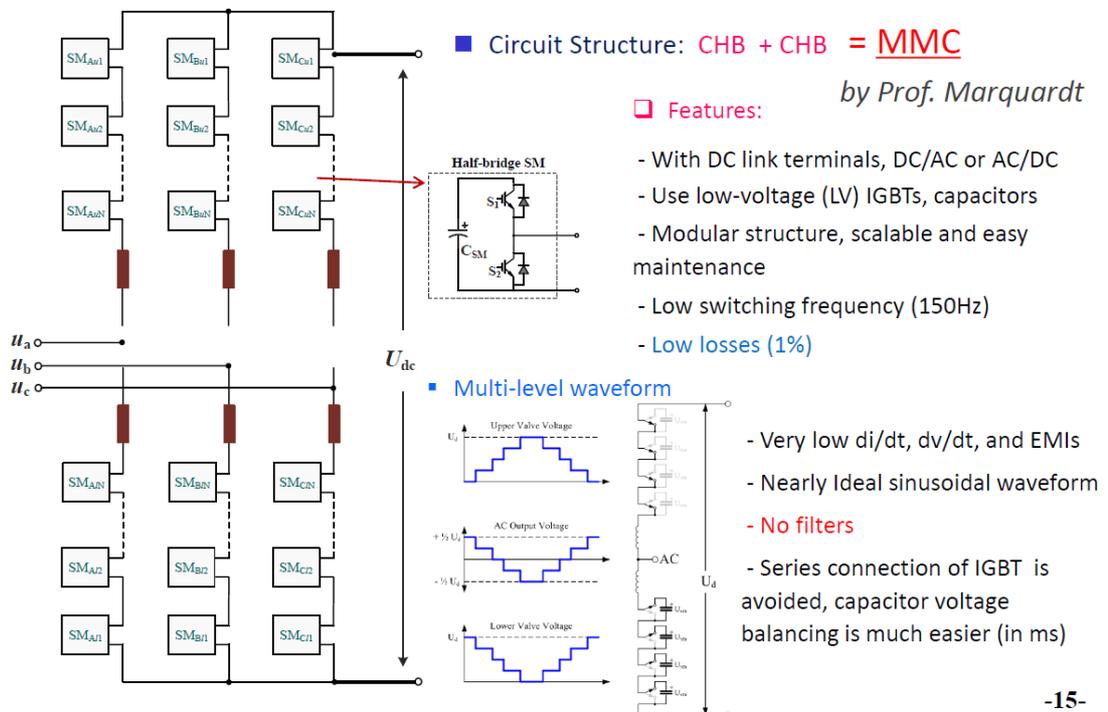


Abbildung 3: Aufbau einer MMC-Topologie in LtSpice samt Regelungskreisen

Die beiden ersten Topologien wurden miteinander verglichen und zwar an dem maßgeblichen Punkt, an dem sie sich unterscheiden und dadurch andere Anforderungen an die Drosseln zur Folge haben. Bei den Simulationen zeigte sich, dass es einen Unterschied

im Bereich der Nulldurchgänge der Spannungen und somit auch bei der Stromwelligkeit (vgl. gelber Punkt in der nachfolgenden Abbildung) gibt.

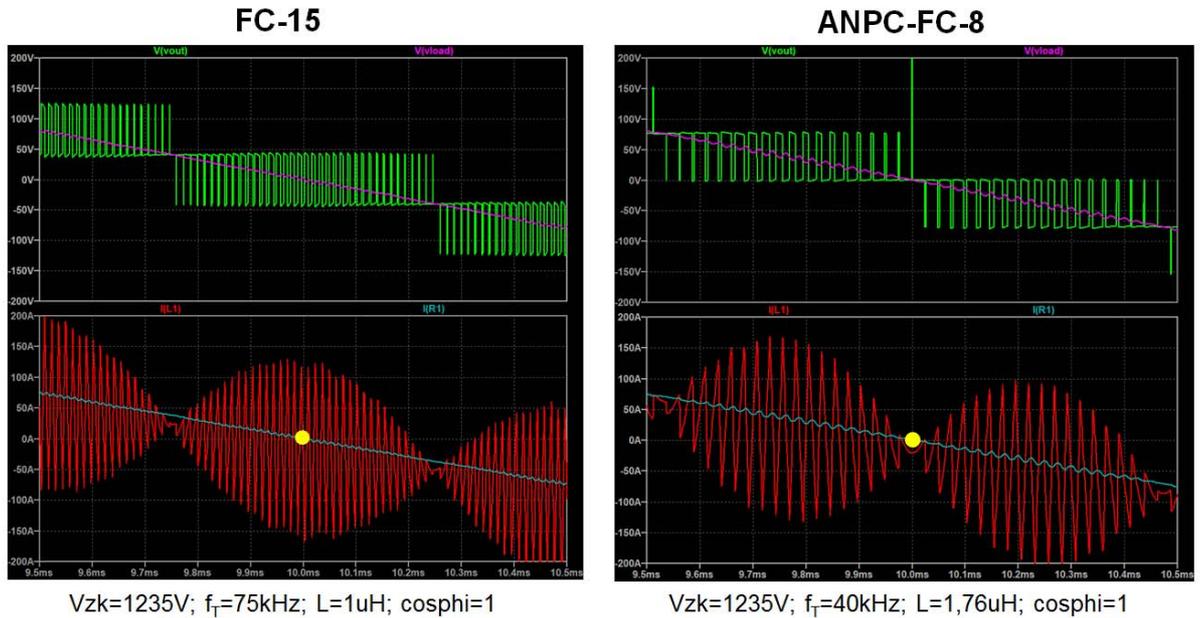
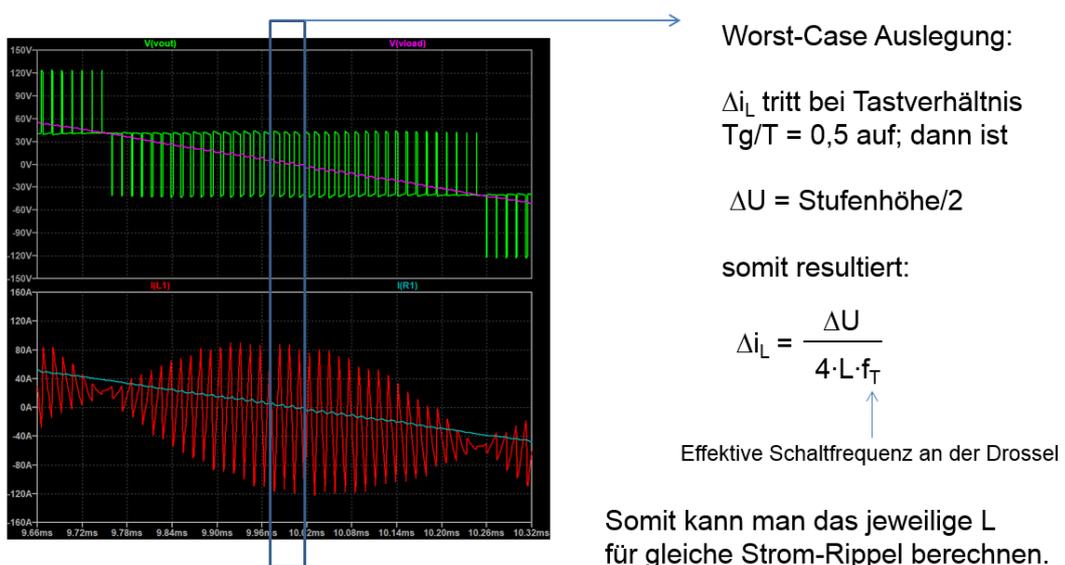


Abbildung 4: Ausgangssignale FC-15 und ANPC-FC-8 im Vergleich (gezoomt) der beiden Topologien an dem maßgeblichen Punkt

Zur Vorbereitung der Auslegung der Induktivitäten wurden auch Untersuchungen zu den Kernmaterialien durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass es sehr stark auf das Kernmaterial ankommt, inwieweit die Steigerung der Ummagnetisierungsgeschwindigkeit bei kleinen oder sehr großen Tastverhältnissen den Einfluss des Induktionshubs kompensiert. Hierzu waren weiterführende genauere Untersuchungen und Berechnungen notwendig.

Für die exakte Berechnung mussten bei der Topologie FC-15 375 Sub-Schleifen berücksichtigt werden.



Somit kann man das jeweilige L für gleiche Strom-Rippel berechnen.

Abbildung 5: Ansatz für Auslegung der Drossel (Kernverluste)

Aus den mit LtSpice-Simulationen ermittelten Anforderungen in Verbindung mit den Ergebnissen aus den durchgeführten experimentellen Untersuchungen/Messungen wurden nun mögliche Drossel-Spezifikationen erarbeitet.

Tabellarisch dargestellt sind die sinnvollsten und realitätsnahesten Spezifikationen. Die zugrunde liegenden Ströme obliegen dem jeweiligen Umrichterdesign der Verbundpartner und sind dort zu entnehmen.

Tabelle 1: Vergleichende Auslegung gleicher Strom-Rippel

	FC-15	ANPC-FC-8	MMC-18
Anzahl Spannungsstufen bezogen die Drossel	15	16	18
Höhe der Spannungsstufen Spitze-Spitze @ VzK = 1235 V	82,3 V	77,2 V	68,6
Zell-Schaltfrequenz	5 kHz	5 kHz	5 kHz (2 Zellen)
Schaltfrequenz an der Drossel	75 kHz	40 kHz	10 kHz
Induktivitätswert	1,37 $\mu$ H	2,41 $\mu$ H	8,58 $\mu$ H

In Vorbereitung des Aufbaus von Testmustern aussichtsreicher Konzepte für die Induktivitäten waren noch Untersuchungen zu den möglichen Designs erforderlich.

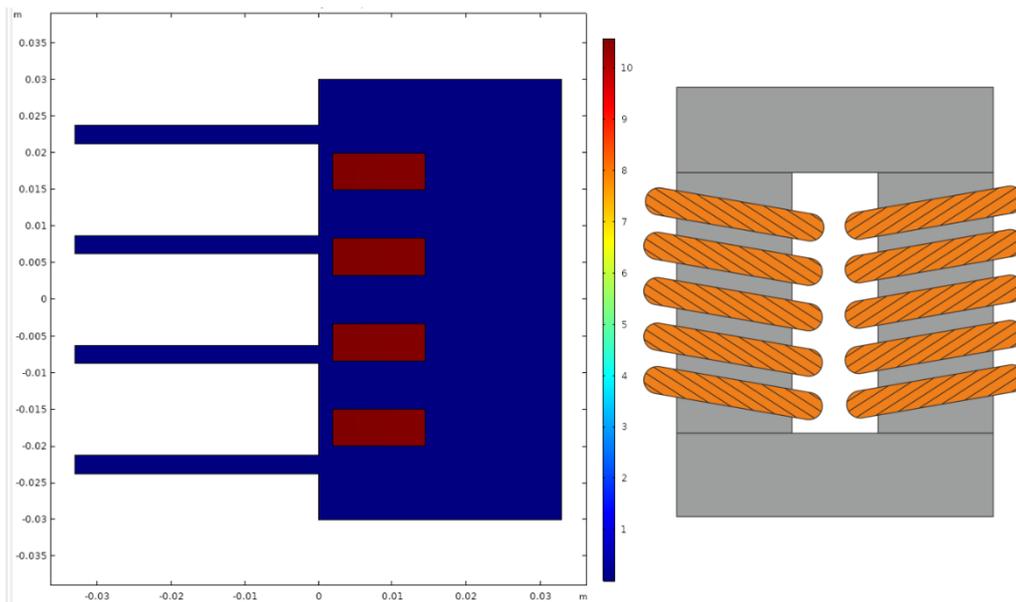


Abbildung 6: Links: FEM-Simulationen zur  $R_{AC}$ -Berechnung und daraus resultierender Verlustleistung im Wickelgut  
Rechts: Schematische Darstellung einer URR-Drossel

Des Weiteren mussten auch Untersuchungen durchgeführt werden, um ein Konzept für die Entwärmung der aussichtsreichsten Varianten zu finden. Dabei wurde die beste thermische Performance unter Einsatz von Flachdraht und Flachlegen des Wickels ermittelt.

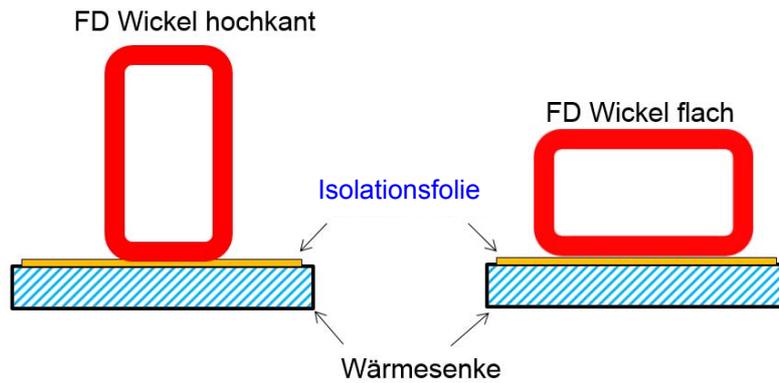


Abbildung 7: Schematische Lösungsansätze für die Drossel-Entwärmung

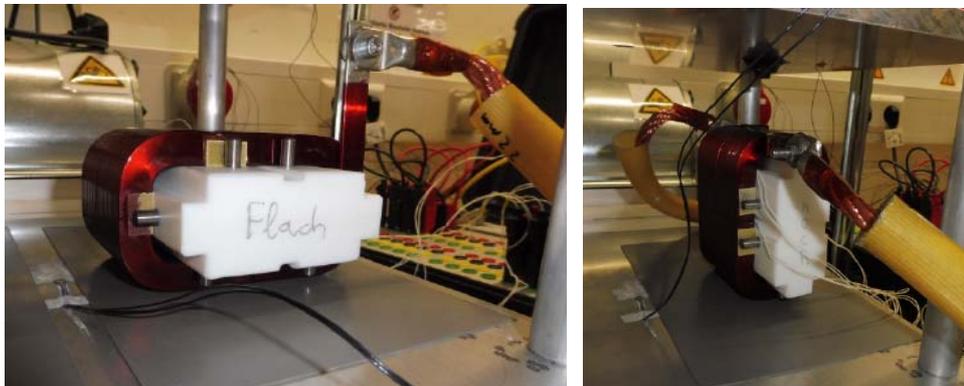


Abbildung 8: Experimentelle Aufbauten für die Untersuchung der Flachdraht-Entwärmung

Nach den bei STS vorhandenen Erfahrungswerten war bei einigen in Betracht kommenden Kernmaterialien in Verbindung mit den im Projekt auftretenden Schaltfrequenzen mit einer erheblichen Lärmentwicklung zu rechnen. Mit der Erstellung eines experimentellen Aufbaus wurden hierfür die notwendigen messtechnischen Voraussetzungen geschaffen, um dies an zwei Kernmaterialtypen exemplarisch untersuchen zu können.

Mit den Untersuchungen wurden folgende Fragen geklärt:

- Lärmentwicklung von Pulverringkernen bei DC- und Ripplebelastung im niederen kHz-Bereich
- Welchen Einfluss hat die Magnetostriktion auf die Lärmentwicklung bei unterschiedlichen Materialien (1 u. 2 → siehe unten)?
- Hat die Permeabilität  $\mu_{26}/\mu_{60}$  des Pulverkernes einen Einfluss auf die Lärmentwicklung?

Es wurden erste Aufbauten für die Lärmpegel-Messungen in der Lärmkammer erstellt. Dabei lagen folgende Versuchs-Randbedingungen zugrunde:

- alle Ringkerne gleich bewickelt: N = 61; CuL 1,6 mm (5 Drähte einlagig parallel gewickelt)

- Bauteile mit 2 m/s belüftet
- Lärmpegel im Abstand von 0,8 m in Lärmkammer vermessen
- Hintergrundgeräusch Lüfter bei Material-1-Messung ca. 58 dBA und bei Material-2-Messung ca. 56 dBA
- der L(I)-Verlauf muss bei den zu vergleichenden Materialien nahezu identisch sein, da ansonsten ein Vergleich an der unterschiedlichen Kernaussteuerung scheitert



Abbildung 9: Versuchsaufbau für Lärmpegel-Messungen in der Lärmkammer

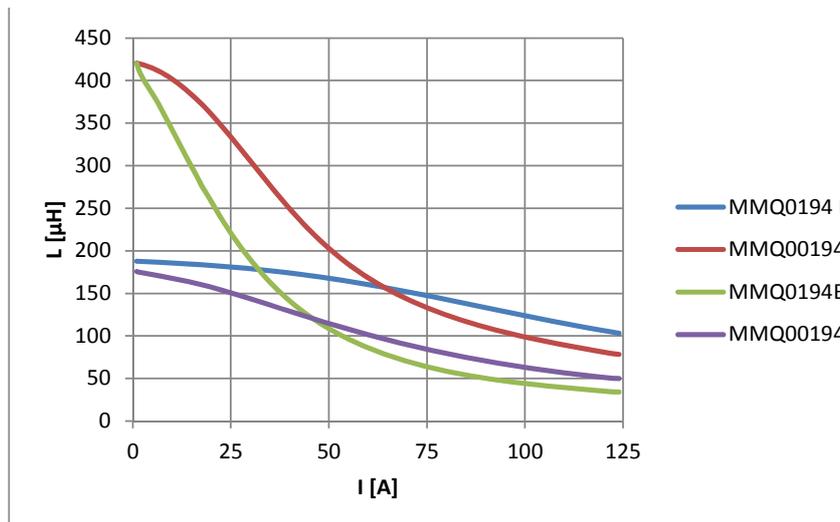


Abbildung 10: L(I)-Kurven der untersuchten Kernmaterialien

Erste Ergebnisse der Messungen waren:

- Material 2 RK zeigen gegenüber Material 1 RK eine geringere Lärmentwicklung sowohl bei reiner Rippelbelastung als auch bei DC plus Rippelbelastungen
- Material 1 RK mit  $\mu 60$  sind leiser als mit  $\mu 26$
- Die Permeabilität von Material 2 RK ( $\mu 26/60$ ) scheint keinen signifikanten Einfluss auf die Lärmentwicklung zu haben

Aus der Essenz der Topologie-Untersuchungen mittels LtSpice sowie der Entwärmungs- und Lärmuntersuchungen ergaben sich folgende Drosseldesigns wie in Tabelle 2 dargestellt:

Tabelle 2: Drosselauslegung

	FC-15	ANPC-FC-8	MMC-18
Kern	URR 30	AMCC (klein)	AMCC (mittel)
Kühlstruktur	nein	ja	ja
L(I)-Verlauf	konstant	konstant	konstant
Pv,ges	53 W	59 W	86 W
Induktivitätswert	1,4 $\mu$ H	2,5 $\mu$ H	8,7 $\mu$ H
Volumen	1,9 l	0,7 l	1,1 l
Abmessungen	181 x 155 x 67 mm	102 x 85 x 78 mm	121 x 108 x 85 mm
Gewicht	3,8 kg	1,8 kg	2,6 kg
Rel. Preis	85 %	85 %	100 %

Die verschiedenen Einflussparameter für die Entscheidungsfindung, welche Variante für den Aufbau der Testmuster am geeignetsten ist, musste noch vertieft werden. Hierzu waren weiterführende Gespräche mit den Konsortialpartnern und Material-Lieferanten notwendig.

Die Untersuchungen zu den Kernmaterialien sowie der Entwärmung der FD-Wickel (FD = Flachdraht) wurden fortgesetzt und anschließend das Design der Funktionsmuster erstellt. Dabei konnten schon konkretere Arbeitspunkte, die sich aus der erarbeiteten Spezifikation für die späteren Prototypen ergaben, berücksichtigt werden.

Für die Koppeldrosseln wurden anhand der festgelegten Spezifikation folgende Designs berechnet:

Tabelle 3: Mögliche Auslegungsvarianten der Koppeldrossel

Kernform	Induktivität [ $\mu$ H]	Strom-Ripple [A]	Gesamtvolumen geschätzt [dm <sup>3</sup> ]
AMCC1000	35	143	6
AMCC1725	55	91	8
AMCC1000 verlängert	60	83	8
2xAMCC1000	80	63	9

Die Koppeldrosseln wurden in folgender Einbausituation eingesetzt, wobei die in der Tabelle dargestellte Belastung (= Teilauszug aus der Spezifikation) der einzelnen Koppeldrossel zu erwarten war.

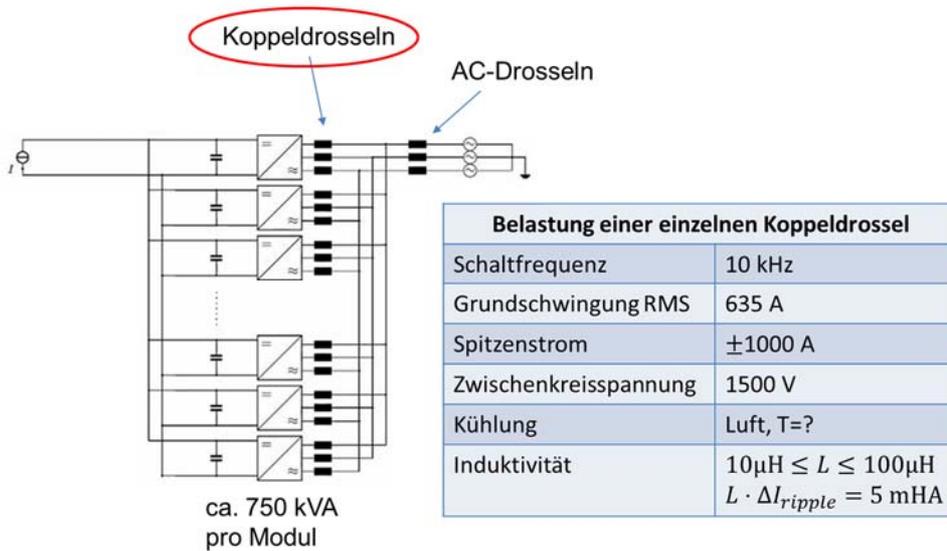


Abbildung 11: 3-Phasen-Gleichrichter mit Koppeldrosseln für SiC-Variante (Quelle: Uni Rostock)

Auf der Grundlage obiger aufwendigen Design-/Konzeptstudie wurde die Entscheidung getroffen, eine Drossel mit AMCC-Kern und Flachdraht als Wickelgut zu verwenden.

Anschließend wurden die noch offenen Punkte aus der Spezifikation näher beleuchtet und folgende Festlegungen getroffen:

- Die Kühlung erfolgt über Kühlplatte mit T<sub>max</sub> von ca. 70 °C.
- Ausleitungsführung über Anschlusswinkel mit entsprechender Bohrung aufgrund benötigter Stromtragfähigkeit.

Nach der finalen Klärung der Spezifikationen im Rahmen eines Projekttreffens ergab sich die Anforderung, die Drossel möglichst klein und kostengünstig zu gestalten. Durch weitere Optimierungen konnte die Baugröße auf AMCC-800 reduziert werden.

Flankiert wurden die Untersuchungen von FEM-Simulationen, die mit Ergebnissen der Kern- und FD-Untersuchungen gespeist wurden, um das thermische Verhalten besser beschreiben und vorhersagen zu können.

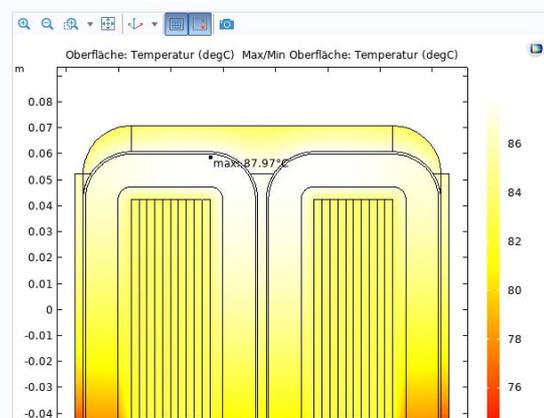


Abbildung 12: Simulation des thermischen Verhaltens: Entwärmung der Flachdrahtwicklung mittels formtreuer Kühlerstruktur

Nachdem alle Berechnungen und Simulationen abgeschlossen waren, wurden entsprechende Funktionsmuster der Drosseln aufgebaut. Jede Drossel wurde mit Thermosensoren versehen, damit diese im Betrieb an der Uni Rostock thermisch vermessen und ggf. überwacht werden können.



Abbildung 13: Funktionsmuster der Drosseln mit eingebauten Thermosensoren für die Erprobung an der Uni Rostock

Die Drosseln wurden vor der Auslieferung bei STS charakterisiert. Dabei wurde der Thermolauf sowie der Induktivitätsverlauf  $L(I)$  über dem Strom ermittelt. Durch die Ermittlung des thermischen Verhaltens der Drosseln war es möglich, eine erste Einschätzung vorzunehmen und später für den Abgleich mit der Uni Rostock heranziehen zu können. Der  $L(I)$ -Verlauf ist ein Qualitätsmerkmal zur Einhaltung der Spezifikation. Hierbei war es zudem wichtig, dass sich die drei Drosseln untereinander identisch verhalten, um keine Asymmetrien im Regelungs- und Steuerungsverhalten während des Betriebs zu bekommen. Wie Abbildung 14 zeigt, ist dieses identische Verhalten im Rahmen der Messgenauigkeit vollständig erreicht worden.

Ebenso ist im Thermolauf (Abbildung 15) eine ausreichende Reserve erreicht worden, so dass bei Beaufschlagung der Drosseln mit einem AC-Strom während des Betriebs eine Überhitzung nahezu ausgeschlossen werden konnte. Somit sollte zu diesem Zeitpunkt des Projekts eine Erstinbetriebnahme aus Sicht der Drosseln funktionieren.

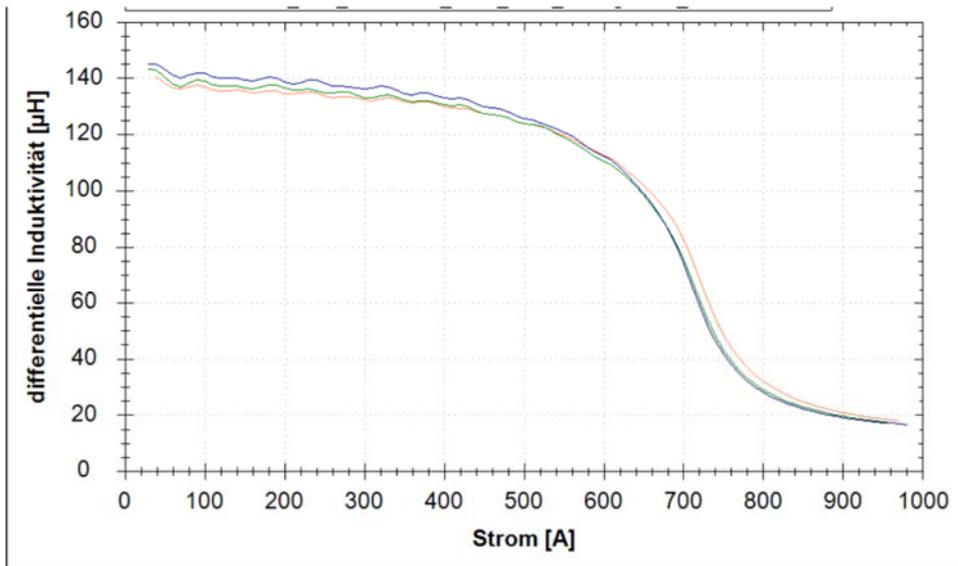


Abbildung 14: Messung des Induktivitätsverlaufs über dem Strom bei den realisierten Funktionsmustern

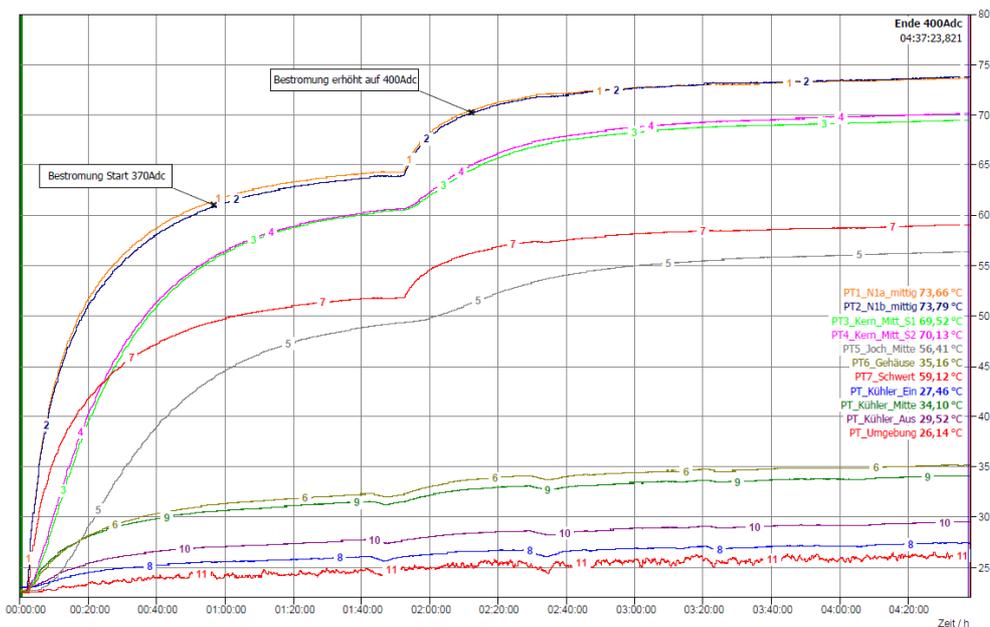


Abbildung 15: Messung des Thermolaufs der realisierten Funktionsmuster

Im Rahmen einer tiefgehenden, internen Bewertung wurde festgestellt, dass bei den Drosseln noch weiteres Optimierungspotential zur Erhöhung der Leistungsdichte besteht. Deshalb wurden die Grundlagenuntersuchungen durch Simulationen mittels FEM bezüglich der Verluste in den Wicklungen und durch Experimente zum Thermomanagement weitergeführt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die finale Spezifikation (Minimalangaben, um die Auslegung durchführen und Verluste in Kern und Wicklung berechnen zu können).

Tabelle 4: Spezifikation der STS-Drosseln, die weiter untersucht wurden

<b>Belastung einer einzelnen Koppeldrossel</b>	
Schaltfrequenz	10 kHz
Grundschiwingung RMS	300 A @ 50 Hz $\Delta I_{ripple} = 50$ A
Spitzenstrom	$\pm 450$ A
Isolationsfestigkeit	1500 V
Kühlung	Kühlplatte $T_{max} = 70^{\circ}\text{C}$
Induktivität	$L = 140\mu\text{H}$

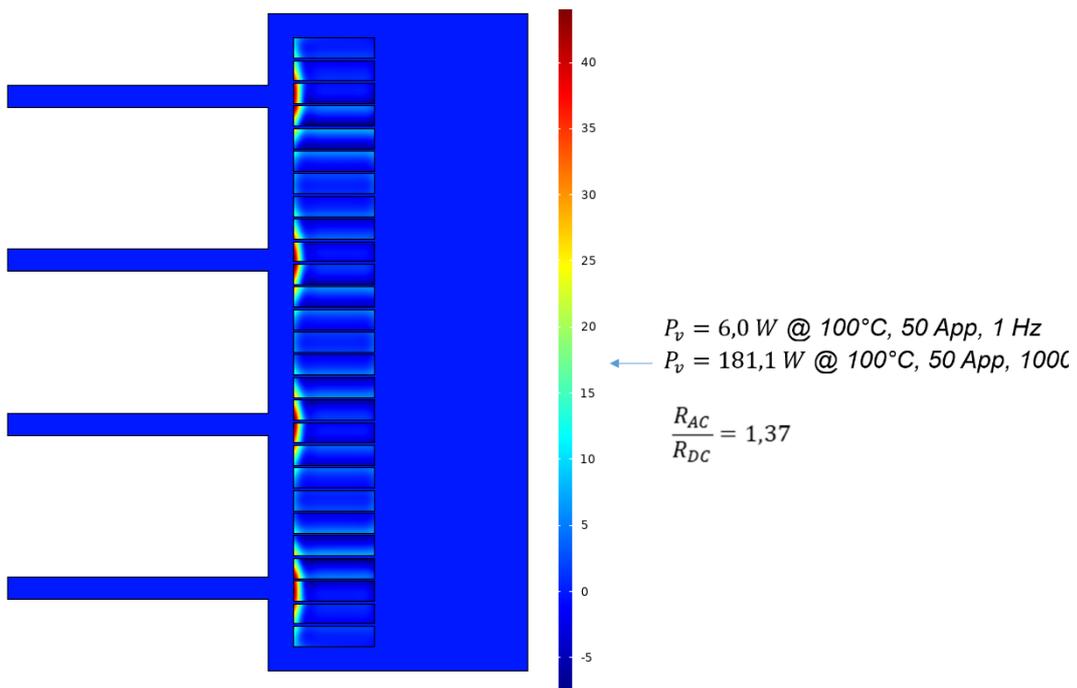


Abbildung 16: FEM-Simulation/grafische Darstellung der Stromverteilung; berechneter Wert  $R_{ac}/R_{dc}$  ist ein Indikator wieviel Stromverdrängung im Draht vorliegt

Die auftretenden Verluste müssen mittels optimierter Entwärmungsstruktur abgeführt werden. Damit die Leistungsdichte erhöht werden konnte, standen u.a. die Kontaktflächen der Wicklung zu den Kühlstrukturen im Fokus.

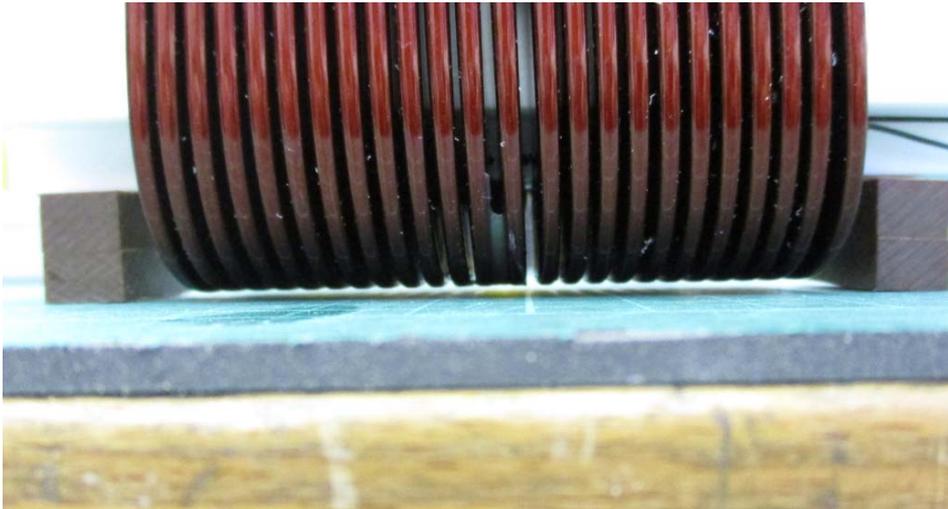


Abbildung 17: Nahaufnahme eines FD-Wickels → verdeutlicht Kontur, die zu einer optimierten Entwärmung angebunden werden muss

Damit eine optimale Entwärmung erreicht wird, spielen die Kontur der Wicklung und das Anliegen der Wicklung auf die Kühlstruktur eine entscheidende Rolle. Hierzu wurde mit weiteren Kühlstrukturen und Druckmechanismen experimentiert, um ein gutes Anliegen realisieren zu können.

Zur Unterstützung und Plausibilisierung wurden wiederum thermische FEM-Simulationen durchgeführt, die die Anbindung der Wicklung und des Kerns an das Kühlsystem berücksichtigten.

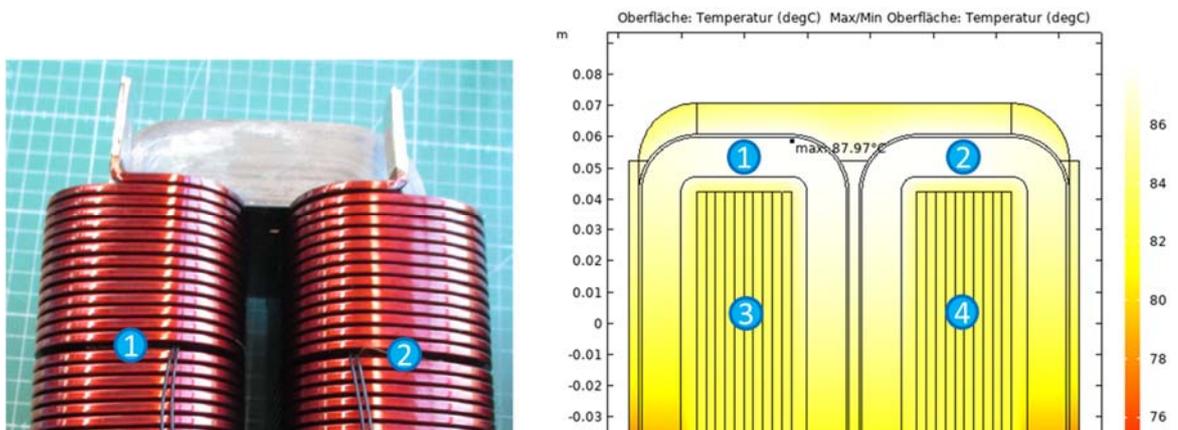


Abbildung 18: Links: „nackte“ Drossel (Kern + Wickel); rechts FEM (thermische Darstellung); Zahlen indizieren die Messpositionen der Thermosensoren bzw. die Auswertestellen in der FEM

Zur Steigerung der Bauteil-Performance wurden weitere Möglichkeiten untersucht:

- 1) Experimente zum Material in den Luftspalten der Drosseln: Ziel war es, ein thermisch besser leitfähiges Material als bisher zu finden, das zudem die Anforderungen an seine mechanische Beanspruchung nach wie vor erfüllt.
- 2) Experimente zu einem besseren Füllgrad beim Vergießen: Hierzu wurden Untersuchungen mit dem Druckhärtungsverfahren durchgeführt. Ziel war es, dass das Vergussmaterial besser in kleinere Zwischenräume eindringt, um so eine optimierte thermische Anbindung sowohl von Kern als auch Wicklung zu erreichen.

Als letzter Schritt erfolgte ein Abgleich des Thermolaufs zwischen Simulation und Experiment. Hierfür wurde zunächst der experimentelle Thermolauf ausgewertet, um anschließend die gewonnenen Messwerte mit den Simulationen vergleichen zu können.

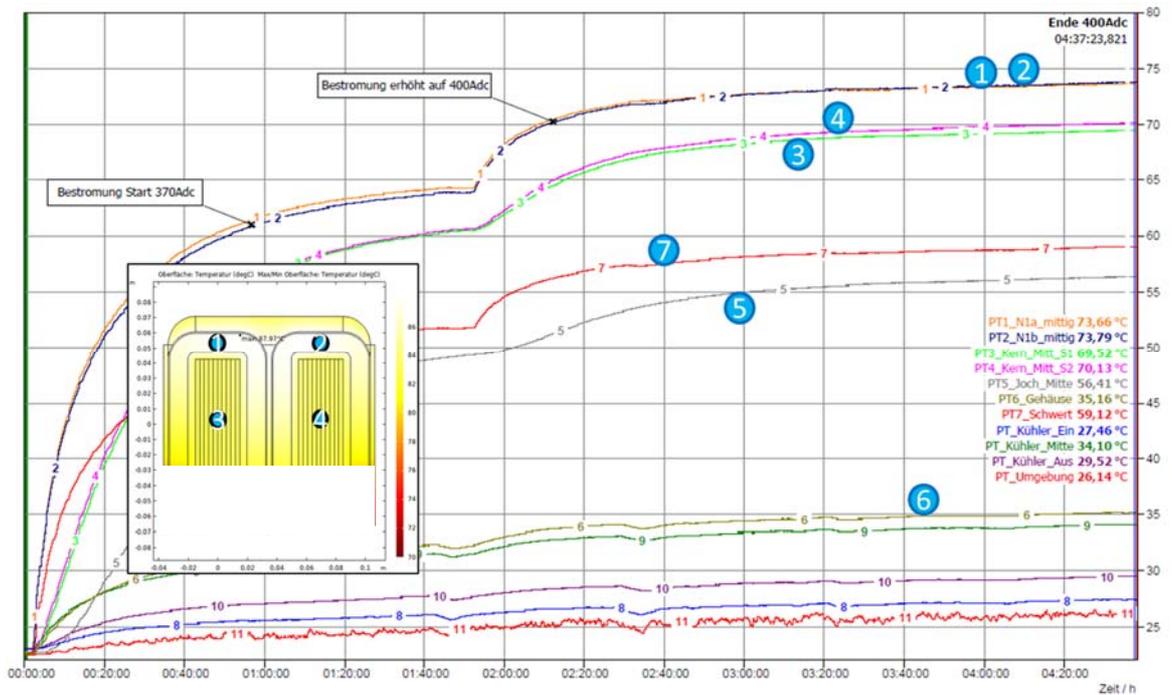


Abbildung 19: Darstellung des experimentellen Thermolaufs im Vergleich zum Simulationsergebnis

Das Vergleichsergebnis zeigte, dass die simulierten Werte mit den experimentell bestimmten Temperaturwerten im Bereich von  $\pm 10\%$  übereinstimmen und somit in Zukunft eine zuverlässige Vorhersage der zu erwartenden Temperaturverteilung gegeben ist und die optimierten Entwärmungspfade ihre Wirkung entfalten können. Letzteres, weil sich die Temperaturunterschiede innerhalb des Bauteils und die Absoluttemperaturen verringert haben.

**Arbeitspaket 6: Vergleich und Bewertung**

Die von STS gelieferten Drosseln wurden beim Verbundpartner Uni Rostock in einen Versuchsaufbau integriert, vermessen und ausführlichen Tests unterzogen. Dabei zeigte sich, dass die induktiven Bauelemente ihre Funktion optimal erfüllen und bereits in diesem Entwicklungsstadium Vorteile in der Volumeneinsparung aufweisen.

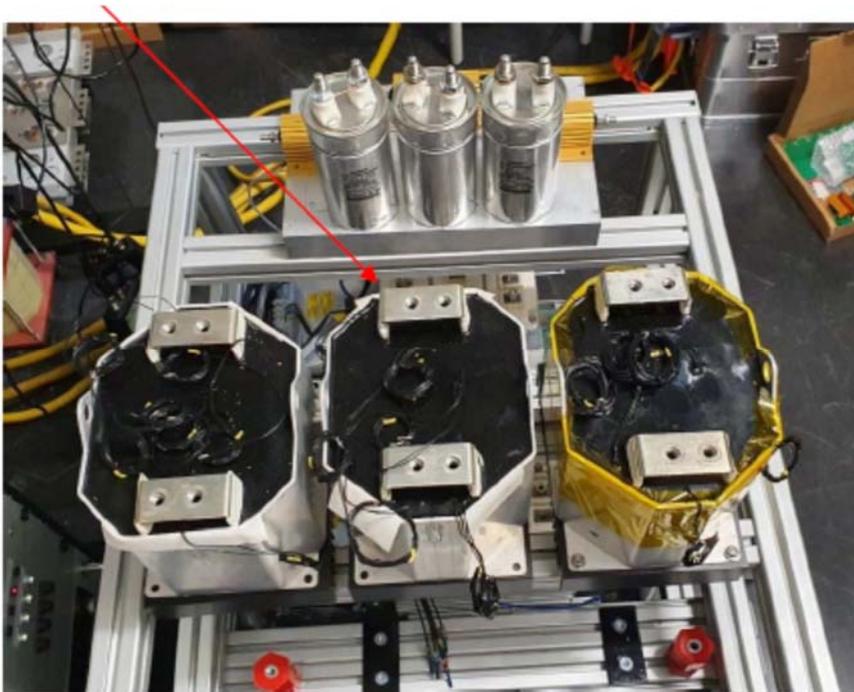


Abbildung 20: Aufbau bei Uni Rostock; Drosseln sind auf Test-Bench montiert.

Ein Abgleich der Absoluttemperaturen ergab, dass die berechnete und gemessene Temperaturverteilung an allen Positionen innerhalb einer Toleranz von  $\pm 5\%$  (auch am Hot-Spot) übereinstimmen. Die Rückrechnung mittels FEM-Tool ergab, dass eine Hot-Spot-Temperatur von ca.  $71^{\circ}\text{C}$  erreicht wurde.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die berechneten und gemessenen Werte bei STS an den unterschiedlichen Bauteile-Positionen im Vergleich zu den Messwerten an der Uni Rostock.

Temperatur T	DC-Thermolauf STS	2D-Simulation STS 305Aeff	AC-Thermolauf Uni Rostock 305Aeff
Strom	400 Adc	305 Aeff	305 Aeff
Gehäuseboden	$35^{\circ}\text{C}$	$45^{\circ}\text{C}$	$45^{\circ}\text{C}$
Kühlblech nahe Boden	$59^{\circ}\text{C}$	$60^{\circ}\text{C}$	$58^{\circ}\text{C}$
Kern mittig	$70^{\circ}\text{C}$	$67^{\circ}\text{C}$	$67^{\circ}\text{C}$
Wickel mittig	$74^{\circ}\text{C}$	$71^{\circ}\text{C}$	$70^{\circ}\text{C}$

Durch den kontinuierlichen Austausch von Zwischenergebnissen konnte STS ein klares Bild über die realen Strom- und Spannungsverläufe aufbauen. Zusammen mit der Temperaturverteilung war es nun möglich, die Drosseln weiter zu optimieren. Da Hot-Spot-

Temperaturen von ca. 100°C auch unter Dauerbelastung kein Problem darstellen und somit eine Reserve von ca. 30 K gegeben war, konnte die Leistungsdichte der Drosseln nochmals gesteigert werden. Diese Optimierungen hatten zum Ziel, den Kernquerschnitt der Drosseln von 2000 auf 1500 mm<sup>2</sup> zu verkleinern. Dies führt bei der späteren Serienumsetzung zu erheblichen Volumen- und Kostenersparnis sowohl am Einzelteil aber auch am kompletten Umrichtersystem.

Da der Ausfall von Windkraftanlagen sehr hohe Kosten verursacht, dürfen die Vorteile der Volumen- und Kostenersparnis aber nicht zu Lasten der Ausfallsicherheit und Lebensdauer gehen. Hierfür ist insbesondere das TE-Verhalten ein entscheidendes Kriterium. Deshalb waren diesbezüglich weitere Versuche und Optimierungen notwendig, um die TE-Aussetzspannung z. B. durch gezielte Erdung und Nichterdung zu erhöhen. Durch Optimierung der Abstände zwischen potentialbehafteten Stellen im Bauteil konnte die Aussetzspannung um den Faktor 1,5 erhöht werden.



Abbildung 21: Versuchsträger zur Ermittlung der Aussetzspannung

Bei dem in Abbildung 21 gezeigten Versuchsträger wurde damit eine Erhöhung der Aussetzspannung von 2,5 kV auf annähernd 4 kV erreicht. Es ist in diesem Beispiel zu erkennen, dass eine bewusste Erdung des Kerns zur Gehäusewand untersucht wurde.

Anschließend wurde mit den realen und optimierten Musteraufbauten noch ein Thermolauf durchgeführt.



Abbildung 22: Versuchsaufbau für Thermolauf

Bei der anschließenden Auswertung der Messergebnisse hat sich gezeigt, dass alle vorgegebenen Parameter auch im Langzeittest erreicht werden und somit ein optimales Design gefunden wurde. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Auswertung bei einer Hot-Spot-Temperatur von ca. 100°C und einer Kühlkörper-Temperatur von 30°C.

	SN1 Schenkel 1	SN1 Schenkel 2
Wicklung mittig oben [°C]	97,31	97,31
Kern mitte [°C]	87,77	88,92
Kernjoch oben [°C]	62,88	
Kühlblech unten [°C]	59,36	
Gehäuseboden [°C]	33,03	

Damit waren Lösungsansätze gefunden, wie zukünftig Drosseln für unterschiedliche Einsatzfälle in Windkraftanlagen mit einer höheren Leistungsdichte unter Berücksichtigung der hohen Anforderungen bezüglich Ausfallsicherheit und Langlebigkeit hergestellt werden können.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

- Personalkosten inkl. Gemeinkosten: 314.059,06 €
- Materialkosten 1.478,50 €
- Reisekosten 682,64 €

### 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der geleistete Aufwand war vollumfänglich erforderlich, damit das Teilvorhaben erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Es wurde immer auf einen sorgfältigen Umgang mit den Mitteln geachtet.

### 2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

#### ▫ Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Damit sowohl in Deutschland, Europa aber auch global die klimapolitischen Ziele erreicht werden, wird die effiziente Nutzung der Windkraft eine Schlüsselrolle spielen. Deutschland plant einen massiven Ausbau der Windenergie sowohl onshore als auch offshore. Daraus ergeben sich für STS positive wirtschaftliche Erfolgsaussichten für die Umsetzung des im Rahmen des Verbundvorhabens WindUmEta aufgebauten Know-hows in Bezug auf induktive Bauelemente. Da die untersuchten/entwickelten Drosseltypen eine gesteigerte Leistungs-/Energiedichte aufweisen, werden kleinere Umrichter möglich, was zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der aktuellen und zukünftigen STS-Kunden beiträgt.

Das erarbeitete Know-how wird bereits bei neuen Kunden- und Forschungsprojekten in vollem Umfang eingesetzt und dadurch die Wertschöpfung am Standort Stockach auch für die Zukunft gesichert.

#### ▫ Wissenschaftliche und / oder technische Erfolgsaussichten

STS hat bereits jetzt umfangreiches Know-how für die Miniaturisierung von induktiven Bauelementen erarbeitet, wodurch der Stand der Technik fortgeschrieben wird. Außerdem wurde das Wissen bezüglich der Anforderungsprofile von Windkraftanlagen erweitert.

Die Ergebnisse des Vorhabens werden für weitergehende wissenschaftliche und technische Anwendungen genutzt. Dabei werden unterschiedliche Anwendungen in der elektrischen Energietechnik adressiert.

#### ▫ Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das aufgebaute Know-how lässt sich auch für Umrichtersysteme für andere Anwendungen, wie z. B. Antriebssysteme für Maschinen, aber auch in der Wasserstoffwirtschaft einsetzen. Auch in angestammten Marktsegmenten von STS, wie Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Bahntechnik etc. kann das Know-how übertragen werden.

STS verfügt über ein gut entwickeltes Forschungsnetzwerk. Mit den Forschungspartnern wird ständig Ausschau nach geeigneten wissenschaftlichen Anschlussprojekten gehalten.

Außerdem will STS durch die Vergabe von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten den Kontakt zu Hochschulen und Universitäten zum beiderseitigen Nutzen vertiefen.

Da sich STS in einem sehr dynamischen Markt bewegt, wo neueste Forschungsergebnisse existenziell sind, steht die wirtschaftliche Weiterverfolgung und Verwertung der erarbeiteten Erkenntnisse im Vordergrund.

#### *2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen*

Angesichts der immensen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bedeutung der Energietechnik als solche ist es nahezu folgerichtig, dass während des Projekts auch vielfältige neue und/oder erweiterte Lösungsansätze für leistungselektronische Aspekte offengelegt wurden. Aus Sicht des Teilprojekts geht indes keines der während der Projektlaufzeit bekanntgewordenen Konzepte die Fragestellung der optimierten Auslegung induktiver Bauelemente in der in WindUmEta adressierten Konsequenz und Tiefe an.

Insgesamt kann daher eingeschätzt werden, dass die im Projekt entstandenen Erkenntnisse und Lösungsansätze als weltweit technisch führend angesehen werden können und die Verwertung derselben nicht durch Rechte Dritter behindert wird.

#### *2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses*

Generell wurden Zwischenergebnisse regelmäßig so aufbereitet, dass diese interessierten Dritten präsentiert werden können.

## Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b> ---	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht	
<b>3. Titel</b> Verbundprojekt: WindUmEta – Hocheffiziente Umrichterkonzepte mit Niederspannungs-Leistungshalbleitern für Windenergieanlagen Teilvorhaben: Filterdrosseln – Konzepte und Funktionsmuster		
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Dr. Benner, Daniel	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 30.06.2022	
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b>	
	<b>7. Form der Publikation</b> Sonstiges	
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> STS Spezial-Transformatoren Stockach GmbH & Co. KG Am Krottenbühl 1 78333 Stockach	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b>	
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 03EE2005C	
	<b>11. Seitenzahl</b> 23	
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	<b>13. Literaturangaben</b> ---	
	<b>14. Tabellen</b> 6	
	<b>15. Abbildungen</b> 22	
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b>		
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Jülich, 52428 Jülich		
<b>18. Kurzfassung</b> <p>Im Projekt WindUmEta wurden Lösungsansätze erarbeitet, um den Wirkungsgrad von Umrichtern für Windenergieanlagen, insbesondere im Teillastbereich, zu verbessern. Gegenüber dem Stand der Technik sollten die Schaltverluste der Leistungshalbleiter sowie deren Durchlassverluste bei kleinem Strom reduziert und die Leistungsdichte der Drosseln erhöht werden.</p> <p>Aufbauend auf den applikationsspezifischen Randbedingungen des Verbundpartners WRD wurden an der Universität Rostock verschiedene Umrichterkonzepte zunächst analytisch und simulativ untersucht. Besonders erfolgversprechende Topologien wurden dann im Modellmaßstab realisiert.</p> <p>Im Teilprojekt STS wurden die notwendigen Filter- und Entkopplungsdrosseln für die verschiedenen Konzepte erforscht. Hierzu wurde umfangreiches Know-how im Umfeld der parasitären Eigenschaften und frequenzabhängigen Verluste einschließlich Darstellung in Ersatzschaltbildern aufgebaut. Es wurden Lösungsansätze erarbeitet, wie hochkompakte Drosseln entwärmt und mechanische Schwingungen sowie die Geräuschbildung minimiert werden können.</p>		
<b>19. Schlagwörter</b> Windenergieanlagen, WKA, Umrichter, induktive Leistungsbaulemente, Filter- und Entkopplungsdrosseln, Teillastbereich, Wirkungsgrad		
<b>20. Verlag</b> ---	<b>21. Preis</b> ---	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1828022-4

## Document control sheet

<b>1. ISBN or ISSN</b> ---	<b>2. type of document (e.g. report, publication)</b> Veröffentlichung (Publikation)	
<b>3. title</b> Cooperation project: WindUmEta – High efficient converters with low voltage power semiconductors for wind power plants Subproject: Filter chokes - concepts and functional models		
<b>4. author(s) (family name, first name(s))</b> Dr. Benner, Daniel	<b>5. end of project</b> 30.06.2022	<b>6. publication date</b>
	<b>7. form of publication</b> Document Control Sheet	
	<b>8. performing organization(s) name, address</b> STS Spezial-Transformatoren Stockach GmbH & Co. KG Am Krottenbühl 1 78333 Stockach	
<b>12. sponsoring agency (name, address)</b> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn		<b>9. originators report no.</b> ---
		<b>10. reference no.</b> 03EE2005C
		<b>11. no. of pages</b> 23
<b>13. no. of references</b> ---		<b>14. no. of tables</b> 6
		<b>15. no. of figures</b> 22
		<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b>
<b>17. presented at (title, place, date)</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Jülich, 52428 Jülich		
<b>18. abstract</b> In the WindUmEta project, solutions were developed to improve the efficiency of converters for wind turbines, especially in the partial load range. Compared to the prior art, the switching losses of the power semiconductors and their conduction losses at low current should be reduced and the power density of the chokes should be increased.  Based on the application-specific boundary conditions of the network partner WRD, various converter concepts were initially examined analytically and simulatively at the University of Rostock. Particularly promising topologies were then implemented on a model scale.  The necessary filter and decoupling chokes for the various concepts were investigated in the STS subproject. For this purpose, extensive know-how was built up in the field of parasitic properties and frequency-dependent losses, including representation in equivalent circuit diagrams. Approaches to a solution were developed as to how highly compact chokes can be cooled and how mechanical vibrations and noise can be minimized.		
<b>19. keywords</b> Wind turbines, WKA, converters, power inductivities, filter and decoupling chokes, partial load range, efficiency		
<b>20. publisher</b> ---	<b>21. price</b> ---	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1828023-7