

# Neue Alternativen zur Kurzschlussstrombegrenzung

**Katrin Bäuml\*, Herbert Piereder, Uwe Kaltenborn\***

\*Schneider Electric Sachsenwerk GmbH, Rathenastr. 2, 93055 Regensburg, Germany,  
+49 (0)941 4620 530, [katrin.baeuml@schneider-electric.com](mailto:katrin.baeuml@schneider-electric.com)

Applied Superconductor Ltd, High Quay, Blyth, NE24 2AZ, United Kingdom,  
+44 (0)7921 234 052, [herbert.piereder@apsuli.com](mailto:herbert.piereder@apsuli.com), [www.appliedsuperconductor.com](http://www.appliedsuperconductor.com)

**Kurzfassung:** Während der letzten Jahre kann eine Erhöhung des Leistungsbedarfs im Mittelspannungsnetz beobachtet werden. Auf Grund zusätzlicher dezentraler Einspeisungen in Form von erneuerbaren Energien stiegen die Kurzschlussstromwerte ( $I_{sc}$ ) stetig. Diese Entwicklung wird in Zukunft zusätzlich verstärkt durch die notwendige engere Vermaschung des Verteilnetzwerkes. Neue Verbrauchertypen wie elektrische Fahrzeuge und Energiespeicher, können außerdem zur flexiblen Energieabnahme und Einspeisung beitragen.

In diesem Beitrag wird ein Vergleich der bisher verfügbaren Technologien erstellt, wird ein Ausblick auf neue Lösungsansätze und ein Erfahrungsbericht zur Kommerzialisierung von Kurzschlussstrombegrenzern gegeben.

Schneider Electric hat im Rahmen seines Innovationsprogrammes eine neue Technologie zur Kurzschlussstrombegrenzung auf Supraleiterbasis entwickelt, welche besonders im Hinblick auf die Integration von erneuerbaren Energiequellen wesentliche Vorteile gegenüber den herkömmlich verfügbaren Methoden zur Kurzschlussstrombegrenzung bietet.

Applied Superconductor entwickelt Projekte zur Kurzschlussstrombegrenzung und deckt dabei die Bereiche Netzwerkanalyse, Beratung, Lösungsspezifikation, Systemintegration und -montage, Steuerungs- und Schutzsysteme, Typprüfungen und nahtlose Integration in das Kundennetzwerk im Rahmen der Installation ab. Die intensive Analyse verschiedener Verteilnetzwerke hat gezeigt dass keine der derzeit verfügbaren Technologien alle Problemsituationen im Management von Kurzschlussströmen abdeckt. Applied Superconductor greift daher auf eine Reihe von Technologieentwicklern zu um eine optimale Kundenlösung zu gestalten. Basierend auf der bisher gesammelten Projekterfahrung entwickelt das Unternehmen derzeit eine neue Strombegrenzertechnologie.

Schneider Electric und Applied Superconductor kooperieren, um die weitere Kommerzialisierung von Kurzschlussstrombegrenzern zu beschleunigen.

**Keywords:** induktiv geschirmter supraleitender Strombegrenzer, Strombegrenzung, Einbindung erneuerbarer Energien

## 1 Einleitung

Die aktuelle Netzstruktur basiert auf einem, in eine Richtung ausgerichteten Lastfluss, welcher eine zentrale Energieerzeugung voraussetzt. Die Leistung wird dabei im Hochspannungsnetz im Wesentlichen von Punkt zu Punkt oder mittels einfacher Ringstrukturen übertragen sowie strahlenförmig bzw. von Punkt zu Punkt im

Mittelspannungsnetz. Diese Situation ist schematisch in **Bild 1** dargestellt. Entsprechend der regulatorischen Vorgaben ist die Netzspannung und Frequenz dabei stabil in der vorgegebenen Bandbreite zu halten. In einem solchen System kann durch die Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch ein stabiler Netzbetrieb ermöglicht werden, da Energieverbrauch und Erzeugung planbar sind. Um unvorhergesehene Lastspitzen beherrschen zu können, wird eine entsprechende Kraftwerksreserve (spinning reserve) vorgehalten.

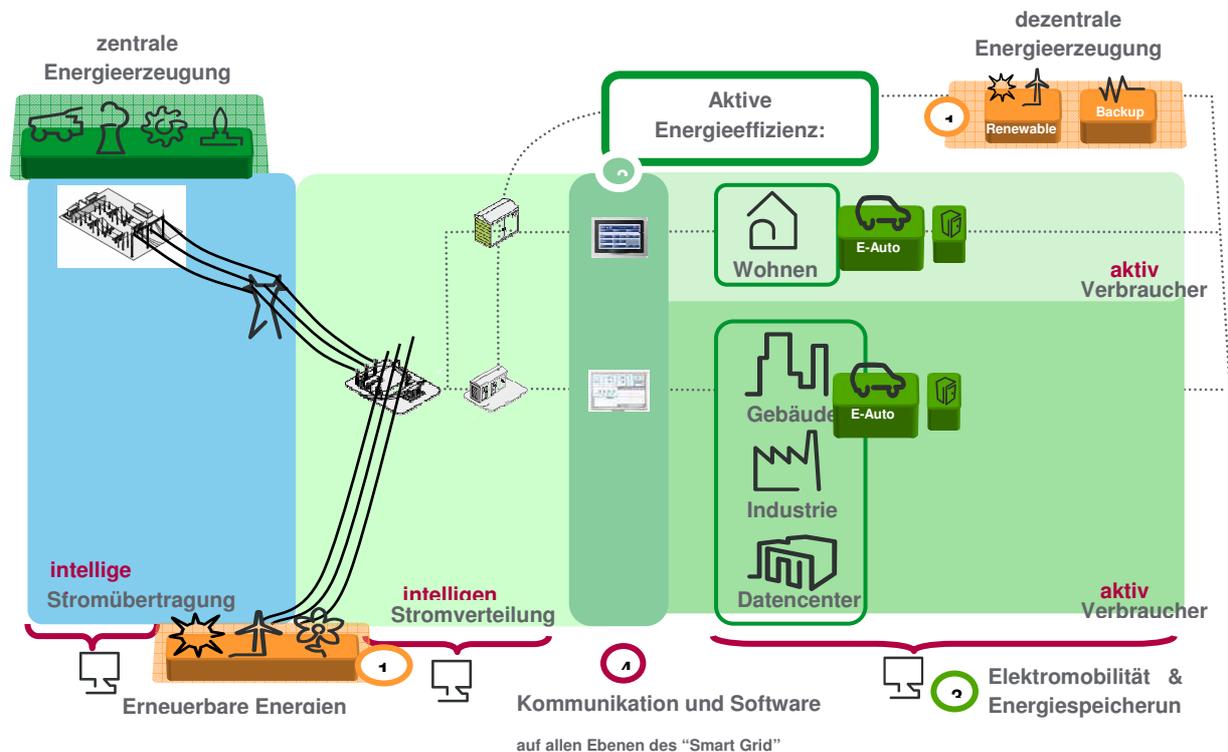


Bild 1: aktuelle Situation im Übertragungsnetz

Mit dem Aufbau von dezentralen Erzeugungseinheiten, die entweder auf der Ebene des Niederspannungsnetzes oder des Mittelspannungsnetzes Energie in das Netz einspeisen, ergibt sich zwangsweise ein bidirektionaler Lastfluss (**Bild 2**), wenn der Verbrauch eines Netzsegmentes kleiner als die im gleichen Segment erzeugte Leistung ist. Mittel- und Niederspannungsnetze sind bisher nicht für einen bidirektionalen Leistungsfluss ausgelegt. Dafür wären vermaschte Ringstrukturen besser geeignet. Eine planbare Koordination von Energieerzeugung und Energieverbrauch ist bei zusätzlichen intermittierenden Einspeisungen der erneuerbaren Energien nicht mehr möglich. In der Konsequenz ist dann auch die maximal mögliche Kurzschlussleistung in einem Netzsegment mit erneuerbaren Energieverteilern nicht mehr eindeutig definierbar. Weiterhin ist zu beachten, dass dezentrale Erzeuger mit einem signifikanten Spitzenleistungsbeitrag immer auch Wirkleistung einspeisen müssen. Hintergrund ist, dass im Fehlerfalle die installierten Schutzrelais und deren Algorithmen die Fehler identifizieren und lokalisieren müssen (fault right through). Eine Auslegung muss dann auf maximal mögliche Kurzschlussleistung erfolgen. Da diese die maximal zulässigen Werte der installierten Geräte überschreiten können, müssen diese Kurzschlussströme technisch sicher behandelt werden. Die kostenintensive Lösung ist die Ertüchtigung aller installierten Geräte auf die entsprechend

höheren Kurzschlusswerte. Eine Alternative stellen jedoch auch die verschiedenen Kurzschluss-Strombegrenzer-Technologien dar.

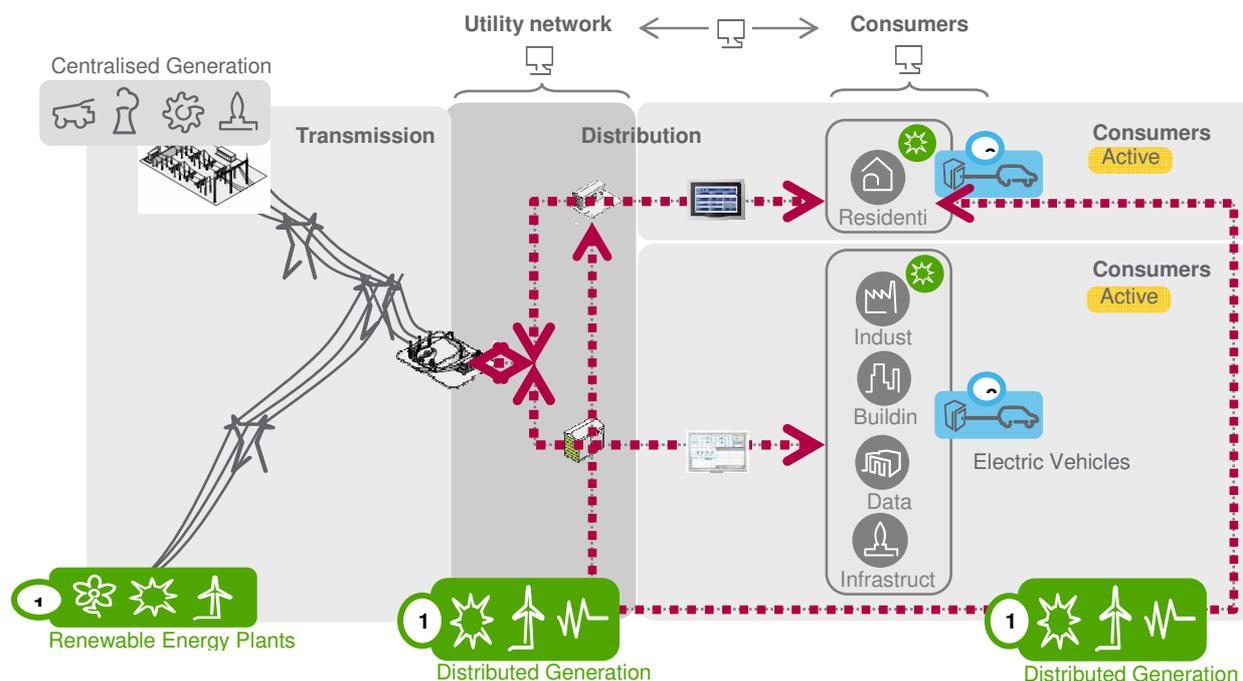


Bild 2: zukünftige Netzsituation

## 2 Konventionelle Methoden zur Begrenzung des Kurzschlussstromes

Es gibt mehrere konventionelle Möglichkeiten mit erhöhten Kurzschlussstromwerten umzugehen. Netzbetreiber haben die Möglichkeit, installierte Schaltfelder hin zu größeren Leistungsklassen zu ertüchtigen, die Impedanz durch Auftrennung in kleinere Teilnetzwerke zu erhöhen, andere Transformatoren und Drosselspulen zu installieren. Jeder dieser konventionellen Ansätze kann in der Praxis Nachteile aufweisen:

- Die Auftrennung und Neukonfigurierung des Netzes stellt einen massiven Eingriff in die komplexen Kontroll- und Steuerungsstrategien dar. Diese müssen der spezifischen lokalen Netztopologie angepasst sein. Solche Aufwendungen lassen sich nur im Zusammenhang mit der Erneuerung der Netzleittechnik ökonomisch sinnvoll darstellen. Bei solchen Ansätzen muss die notwendige Redundanz zur Gewährleistung des n-1-Kriteriums sichergestellt werden. Fehler im Bereich der Schutzeinstellungen zum Beispiel beim Staffel- oder Differentialschutz können verheerende Auswirkungen im Falle eines elektrischen Fehlers haben, wenn entweder ein Fehler (z.B. Erdschluss) nicht erkannt wird, oder im Falle des Versagens eines untergeordneten Schutzelementes (Trennschalter oder Leistungsschalter) die übergeordnete Schutzebene nicht oder zu spät den Fehler abschaltet.
- Die Ertüchtigung installierter Schaltfeldern durch solche mit höherer Leistungsklassen stellt eine einfache und meist schnell zu realisierende Möglichkeit zur Verbesserung der Kurzschlussleistung dar. Leider ergibt sich eine ökonomische Sinnfälligkeit für

den Netzbetreiber nur, wenn die existierenden Anlagen das Ende ihrer normativen Nutzungsdauer erreicht haben. Zu berücksichtigen ist hierbei auch, dass das limitierende Element hierbei nicht unbedingt die Schaltanlage ist, sondern die installierten Verbindungen in Form von Kabel- oder Freileitungstrassen. Diese stellen in den meisten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen das wertvollste Asset dar. Die Erneuerung von Kabel- oder Freileitungstrassen ist meist aus Kostengründen und den aus den notwendigen Genehmigungsverfahren resultierenden Zeitschienen nicht realisierbar.

- Der Einsatz von impedanzoptimierten Transformatoren führt zu höheren Produktkosten des Transformators. Im Betrieb bedeutet die höhere Impedanz des Transformators oder der Einsatz von Drosselspulen deutlich höhere Gesamtverluste und zeigt natürlich auch einen Einfluss auf Versorgungsqualität und den Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit durch das Überschreiten von Grenzwertvorgaben für die Emission. Eine Erhöhung der Verluste ist zudem nicht kompatibel mit den gesellschaftlichen Bestrebungen zur CO<sub>2</sub> – Reduktion. Im Falle eines Kurzschlussereignisses ist der Einfluss einer erhöhten Netzimpedanz im Wesentlichen auf die Dämpfung des symmetrischen Kurzschlussstroms begrenzt, der Einfluss auf dem maximalen Stoßstrom ist sehr gering.

Die angeführten konventionellen Lösungen haben Nachteile im Bereich der Vorlaufzeiten, der Kosten, Netzwerkunterbrechungen, Netzqualität und zeigen nicht zuletzt erhöhte Verluste. In der Konsequenz ergibt sich daraus die technische Forderung nach einer Lösung mit geringer Betriebsimpedanz und hoher Impedanz im Kurzschlussfall.

### **3 Alternative Kurzschlussstrombegrenzer**

Eine sowohl technisch als auch kommerziell sinnvolle Alternative zu den herkömmlichen Methoden bietet der Einsatz von Kurzschlussstrombegrenzern. Solche Begrenzer können eingesetzt werden um den Beitrag eines lokalen Erzeugers zum Kurzschlussstrom im Fehlerfall zu limitieren. Eine andere Anwendung ist gegeben durch Sammelschienen mit mehreren Erzeuger-Einspeisungen, deren Kurzschlussstromniveau den Bemessungswert überschreiten. Diese können mit Hilfe von Strombegrenzern geschützt werden. Im Normalbetrieb ist das System der Sammelschienen durchgängig verbunden. Im Fehlerfall begrenzt der Strombegrenzer den Fehlerstrom und verhindert somit die Speisung eines fehlerhaften Stranges durch alle Erzeugungseinheiten. Zum Weiterbetrieb muss dann mit einem konventionellen Leistungsschalter die Sammelschiene aufgeteilt werden. Neben der Kurzschlussstrombegrenzung bieten Strombegrenzer mehrere Möglichkeiten das Netz effektiv zu gestalten. Unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten, wie Sammelschienen- und Netzkopplungen oder Generatorschutz, werden hierbei beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf der Integration von erneuerbaren Energien (Bild 3).



Wendet man auf die bisher beschriebenen Strombegrenzungsmethoden jedoch die Kriterien wie Begrenzungsfaktoren, geringe Impedanz im Normalbetrieb, hohe Impedanz im Fehlerfall, Selbstaktivierung, Fehlersicherheit, mehrfache Einsetzbarkeit, geringe Service- und Wartungskosten an, stellt man fest, dass diese nicht in ihrer Gesamtheit erfüllt werden. In diese Lücke springen neue Konzepte zum Beispiel auf Basis von Supraleitern.

### 3.2 Neue Strombegrenzerkonzepte

Um die oben genannten Anforderungen an Kurzschlussstrombegrenzer zu erfüllen, wurde ein neues Konzept entwickelt: der sogenannte induktiv geschirmte supraleitende Kurzschlussstrombegrenzer (iSFCL).

Dieser Strombegrenzer basiert auf dem Transformator-Prinzip und nutzt dabei den supraleitenden Effekt des perfekten Diamagnetismus aus. Dabei wird im supraleitenden Zustand das magnetische Feld aus dem Inneren des Materials oder einem Ring des Materials verdrängt.

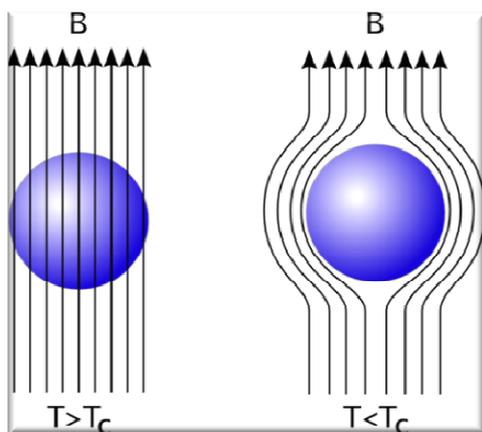


Bild 4: Prinzip des Meißner-Ochsenfeld Effekts

Dieser Effekt wurde von Meißner und Ochsenfeld beschrieben und ist in **Bild 4** veranschaulicht dargestellt.

Beim Konzept des iSFCL wird dieser Effekt folgendermaßen ausgenutzt. Wie in **Bild 5** gezeigt, ist lediglich die normal leitende Primärwicklung des Gerätes direkt mit dem Netzweig verbunden. Die supraleitende Sekundärwicklung ist induktiv mit der Primärwicklung gekoppelt. Wie zuvor erläutert, wird durch die supraleitende Sekundärwicklung der Eisenkern des Transformators im normalen Betriebszustand geschirmt und trägt somit nicht zu den Verlusten im Normalbetrieb bei.

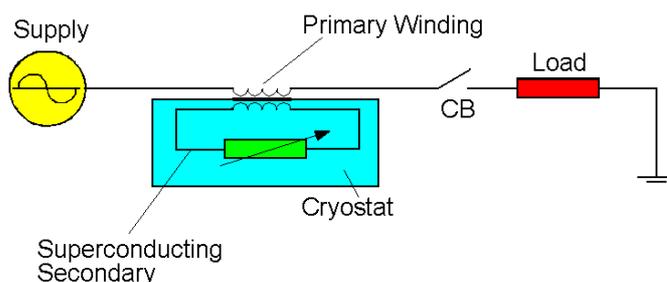
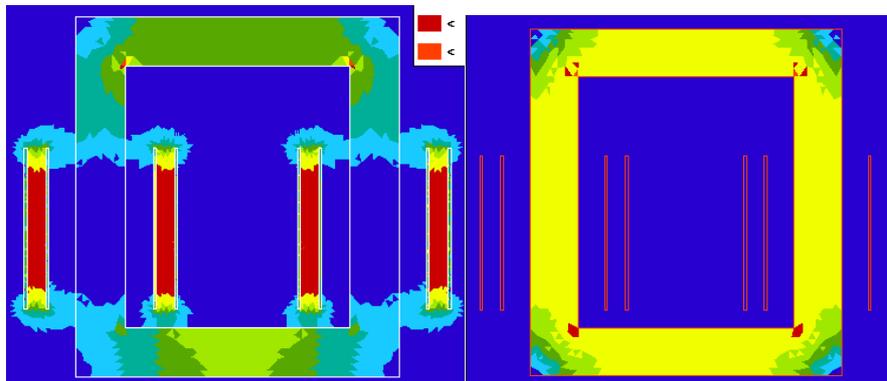


Bild 5: Skizze des iSFCL Aufbaus

Im Fehlerfall verliert der Supraleiter seine abschirmende Wirkung und geht in den resistiven Zustand über. Somit wird nun auch der Eisenkern im Netz sichtbar und trägt zur Begrenzung des Fehlerstromes bei. Dies ist in **Bild 6a** und **6b** gegenüber gestellt.



a) supraleitender Zustand      b) resistiver Zustand

Bild 6: Betriebszustände des iSFCL

#### 4 Vergleich iSFCL - Drosselspule

Im Rahmen eines Verbundprojektes mit den Stadtwerken Augsburg, Bruker Advanced Supercon sowie Bruker High Temperature Superconductor wird in einem Pilotprojekt der iSFCL im Städtetz Augsburg installiert.

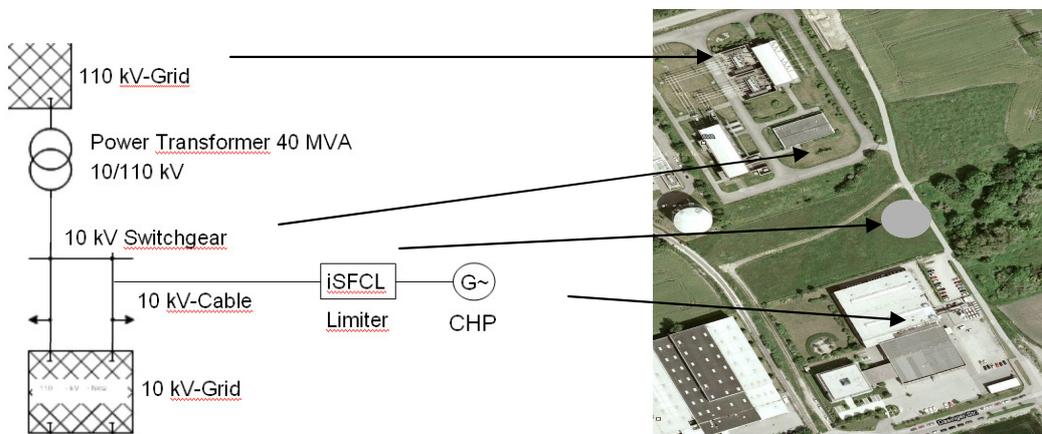


Bild 7: Netzintegration des iSFCL

An dieser Installationsstelle, **Bild 7**, koppelt der iSFCL ein Industrienetz mit alternierenden Erzeugungseinheiten in Form eines Generatorprüfstandes mit dem Netz der Stadtwerke Augsburg. Da der Generatorprüfstand in den nächsten Jahren erweitert wird, ergab sich hieraus eine passende Gelegenheit, den iSFCL zu installieren und im Netzbetrieb zu untersuchen, ohne dabei das vorhandene Netz zu verändern. Der iSFCL arbeitet dabei als Fehlerstrombegrenzer hinsichtlich der Stadtwerke Augsburg, wie auch als Generatorschutz für den Fall eines Generatorfehlers.

Aktuell ist an dieser Stelle eine 6 MVA Drosselspule im Netz installiert. Die Impedanz dieser Drossel liegt bei 1,4 Ohm pro Phase. Die Verlustleistung dieses Gerätes liegt bei 28,57 kW. Um den Leistungsausbau des Generatorprüffeldes ebenfalls über eine Drosselspule

abzudecken, müsste eine 15 MVA Drossel installiert werden. Hierbei wäre mit einer Impedanz von 2,7 Ohm und einer Verlustleistung von 95,07 kW zu rechnen.

Durch Installation des iSFCL soll die Verlustleistung auf 36 kW reduziert werden. Daraus folgt, dass mit Hilfe des iSFCL in etwa 200.000 kWh/a Energie eingespart werden können.

Mit Hilfe des ATP/EMTP Simulationsprogramms wurde das Netz der Stadtwerke Augsburg nachgebildet, **Bild 8**, und ein Vergleich von Drossel und iSFCL hinsichtlich des Begrenzungsverhaltens vorgenommen. In **Bild 9** und **Bild 10** sind die beiden Situationen gegenübergestellt.

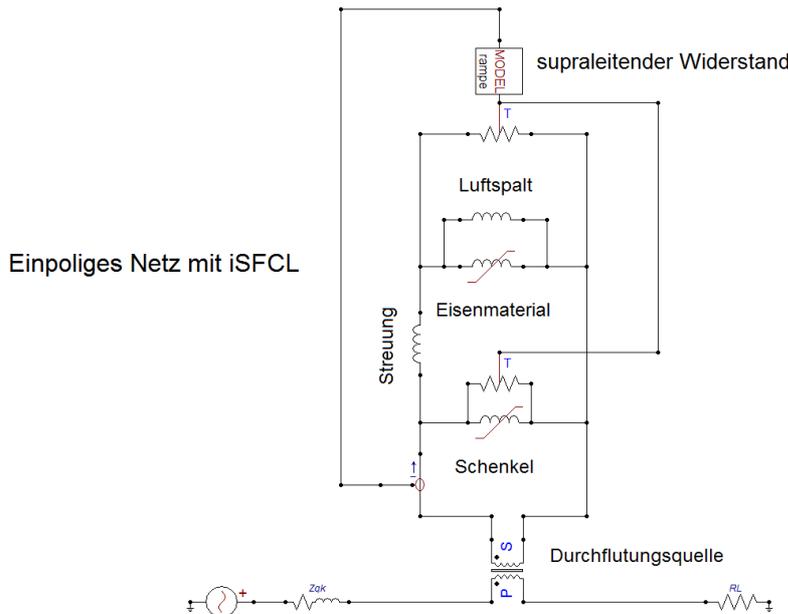


Bild 8: Nachbildung des StawA Netzes in ATP/EMTP

Der prospektive Wert des Kurzschlussstromes liegt in diesem Netzweig bei etwa 20 kA, welcher durch den Einsatz des iSFCL auf 5 kA im ersten Spitzenwert reduziert werden kann.

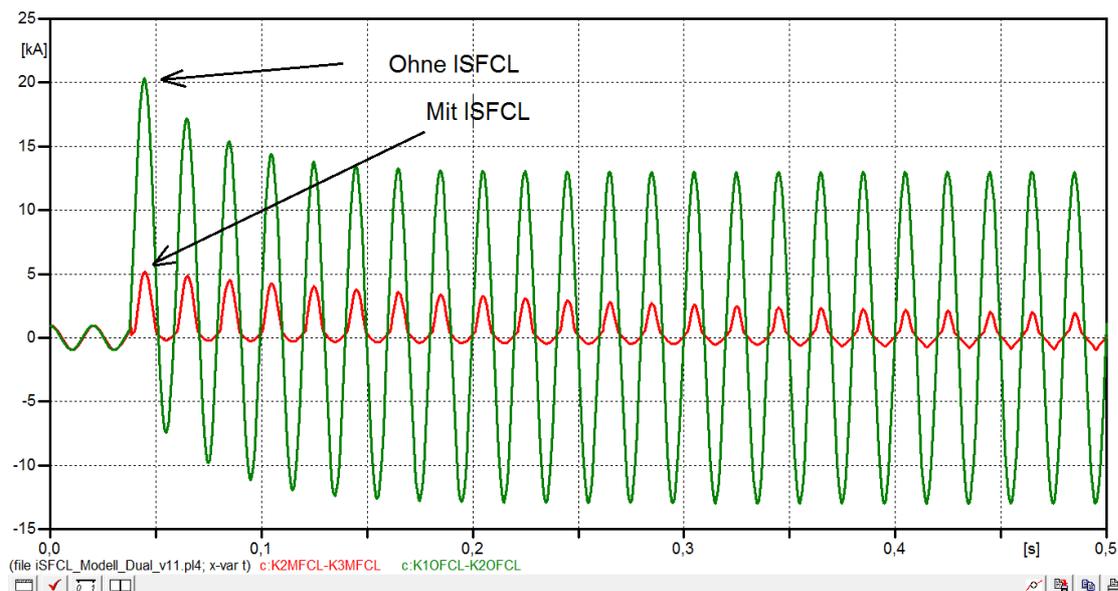


Bild 9: Begrenzungsverhalten mit iSFCL (rot) und ohne iSFCL (grün)

In Bild 10 ist das Begrenzungsverhalten von iSFCL (rot) und vergleichbarer 15 MVA Drossel (grün), bei identischem prospektiven Fehlerstrom, gegenüber gestellt. Die Begrenzung des ersten Spitzenwertes ist bei beiden Betriebsmitteln nahezu identisch. Neben dem insgesamt besseren Begrenzungsverhalten des iSFCL, fällt jedoch auch die Belastung des Netzes in den negativen Halbwellen deutlich geringer aus, was auf den Einfluss des Eisenkerns zurück zu führen ist.

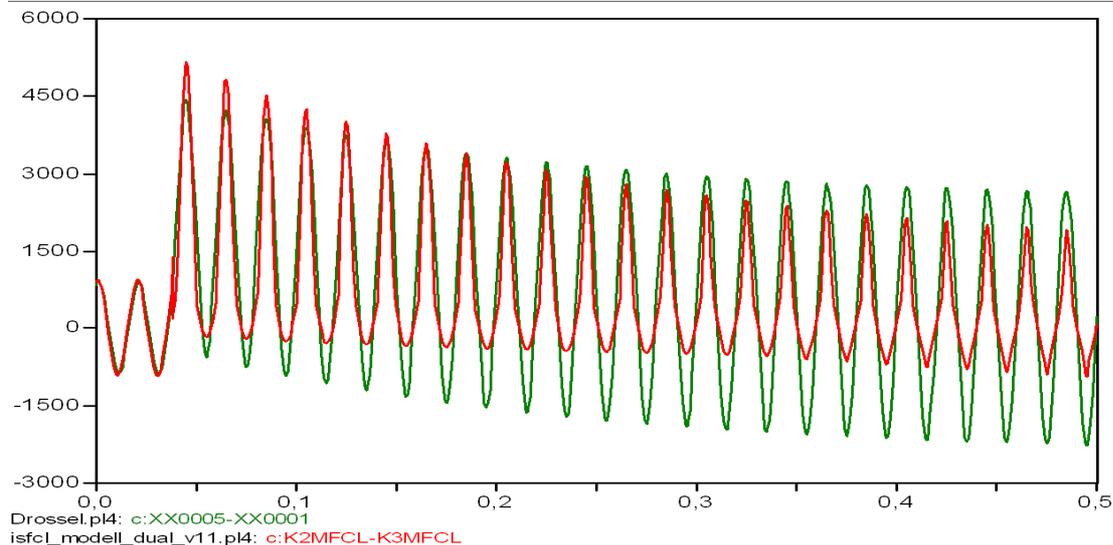


Bild 10: Begrenzungsverhalten mit Drosselspule

Der Vorteil des iSFCL gegenüber der Drossel ergibt sich dadurch, dass im Normalbetrieb der Kern durch die supraleitende Sekundärseite geschirmt wird. Somit sind im Normalbetrieb lediglich die Verluste der Primärwicklung im Netz sichtbar. Die Anzahl der Primärwicklungen kann gegenüber der Drossel jedoch deutlich reduziert werden, da im Fehlerfall auch der Eisenkern zur Begrenzung des Kurzschlussstromes beiträgt.

Vergleicht man daher die Verluste, fallen diese beim iSFCL deutlich geringer aus, als bei einer konventionellen Drossel.

## 5 Projekterfahrungen

Applied Superconductor hat seit Gründung im Jahr 2004 eine Reihe von Verteilnetzwerken hinsichtlich aktueller Kurzschlussfestigkeit und auch hinsichtlich des Einflusses von Anforderungen aus Smart-Grid-Ansätzen untersucht.

Eine der Erkenntnisse war, dass die vielfältigen Problemstellungen derzeit nicht von einer einzigen Strombegrenzertechnologie abgedeckt werden können. Insbesondere ist die Notwendigkeit zu sehen, dass sowohl resistive als auch induktive Technologien (**Bild 11**) bereitzustellen sind.

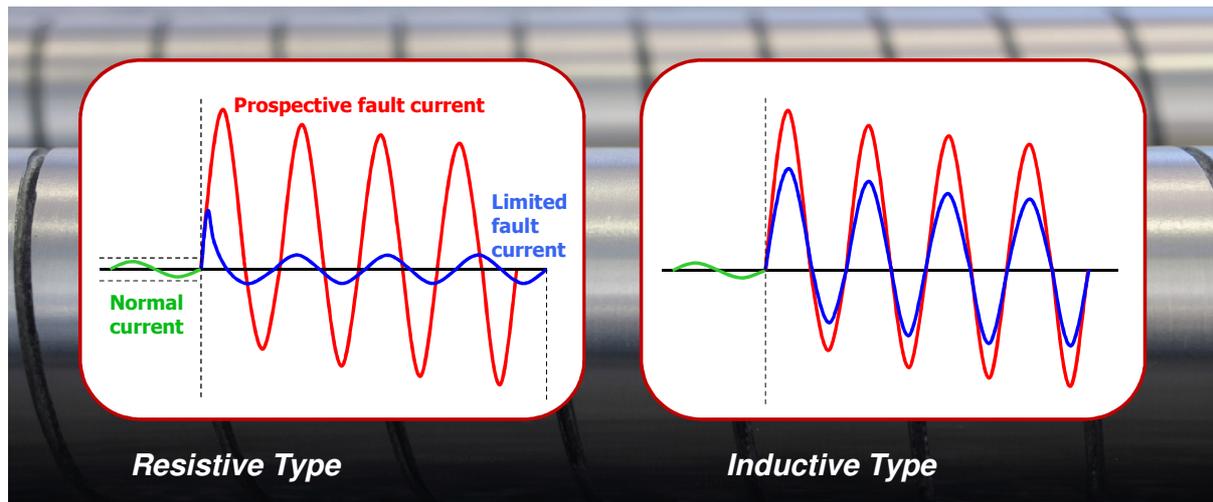
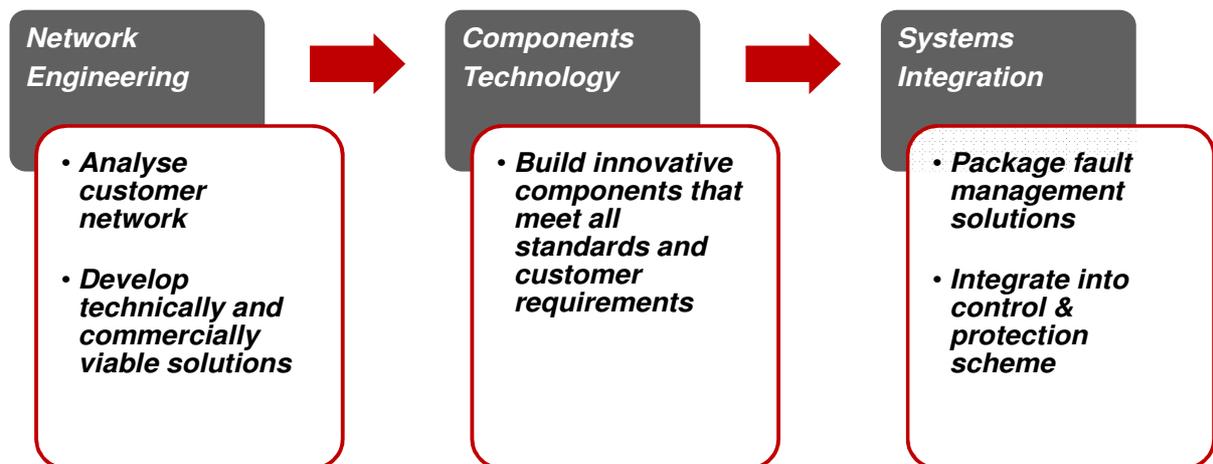


Bild 11: Vergleich des Verhaltens resistiven und induktiven Begrenzungsverhaltens

Applied Superconductor hat daher die Rolle eines Systemintegrators (**Bild 12**) eingenommen, der für den jeweiligen Netzbetreiber die optimale Begrenzertechnologie zugekauft und in das Lösungssystem integriert hat.



### **Fault Current Management Systems**

**Leading edge technologies to make the Smart Grid become a reality**

Bild 12: Lösungsorientierter Geschäftsansatz des Systemintegrators

Dieser Geschäftsansatz hat dem Unternehmen ermöglicht, bisher 5 Projekte mit britischen Netzbetreibern (**Bild 13**) unter Vertrag zu nehmen und damit eine Führungsrolle in der Kommerzialisierung von Kurzschlussstrombegrenzern zu übernehmen.

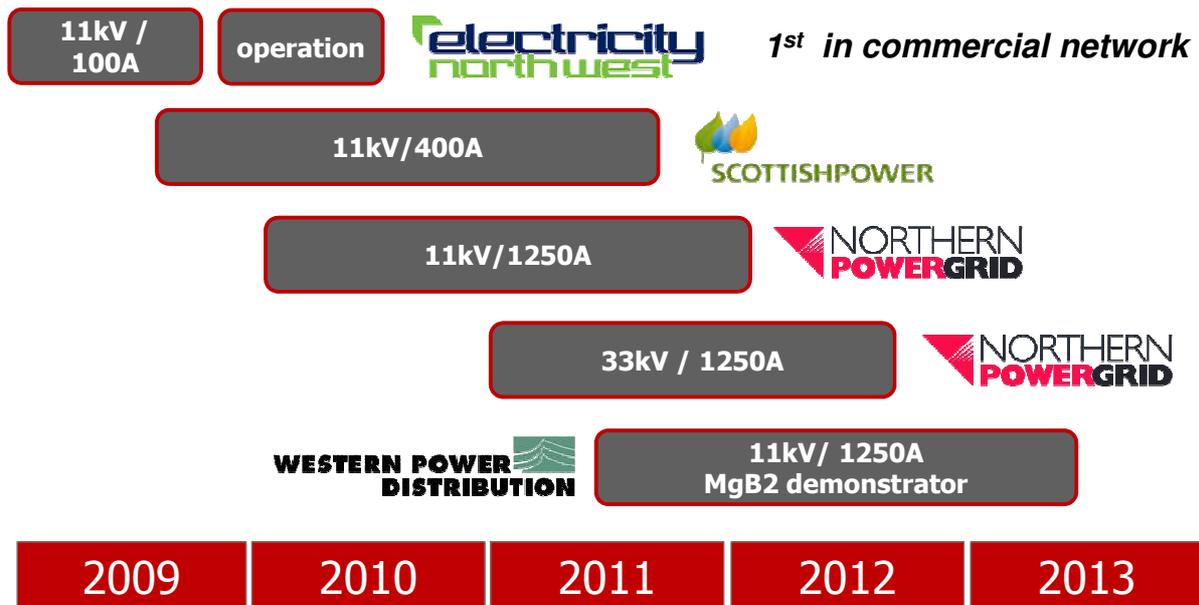


Bild 13: Projektübersicht

Aufbauend auf die bisher gesammelte Projekt- und Technologieerfahrung hat Applied Superconductor begonnen in Zusammenarbeit mit dem britischen Energy Technologies Institute, Rolls Royce und mit dem Netzbetreiber Western Power Distribution eine neue resistive Begrenzertechnologie zu entwickeln. In dieser wird Magnesium diBorid als Supraleiter eingesetzt welches gegenüber bisher verwendeten Materialien wesentlich bessere Leistungsdaten verspricht.

Weiterhin haben sich aus Gesprächen mit Netzbetreibern und aus der Analyse unzähliger Umspannwerke 4 Hauptmarkttreiber herauskristallisiert:

Kurzschlussstrombegrenzer bieten Betreibern von elektrischen Verteilnetzen substantielle Vorteile, indem sie

- den Anschluss von dezentraler Energieerzeugung beschleunigen. Die mit steigenden Kurzschlussstromniveaus einhergehenden Kosten für den Netzausbau werden minimiert.
- helfen Betriebsverluste der Netze zu verringern. Vermaschte Netze haben geringere Verluste, eine höhere Kapazität und führen damit zu einer verbesserten Stromqualität und Netzverfügbarkeit. Kurzschlussstrombegrenzer erlauben die Entfernung von hochimpedanten Transformatoren und Drosselspulen, die wesentlich zu den Netzverlusten beitragen.
- bi-direktionalen Leistungsfluss und damit den erweiterten Anschluss von dezentralen Erzeugungsanlagen ermöglichen. Kurzschlussstrombegrenzer erlauben die Verbindung und Vermaschung von Verteilnetzen unter Belassung existierender Schutzkonzepte. Darüber hinaus helfen sie Asset Management Kosten zu verringern und gleichzeitig die Netzwerksicherheit, -stabilität und -effizienz zu erhöhen.
- eine sichere, schnelle und nachhaltige Lösung für Problemstellungen mit besonderen Platz- oder Zeitrestriktionen (insbesondere im urbanen Bereich) bieten.
- die Möglichkeit einer mobilen, temporären Lösung bieten.

## **6 Zusammenfassung**

Dieser Beitrag untersuchte konventionelle Methoden der Netzgestaltung, um zusätzliche Einspeisungen bestmöglich ins Netz integrieren zu können. Hierbei wurden die Nachteile dieser Methoden deutlich, so dass als weiterer Punkt der Einsatz verschiedener Kurzschluss-Strombegrenzer-Konzepte diskutiert wurde. Da auch dabei zu erkennen war, dass nicht alle Anforderungen optimal erfüllt werden können, wurde das Prinzip des iSFCL vorgestellt und an einem Anwendungsfall veranschaulicht.

Vor allem im Hinblick auf die diskutierten Anforderungen, wie Begrenzungsfaktoren, geringe Impedanz im Normalbetrieb, hohe Impedanz im Fehlerfall, Selbstaktivierung, Fehlersicherheit, mehrfache Einsetzbarkeit, geringe Service- und Wartungskosten sowie reduzierte Verluste, bietet der iSFCL entscheidende Vorteile. Diese wurden im Vergleich zu einer konventionellen Drosselspule herausgearbeitet.

Diese Vorteile können auf Basis mehrjähriger Projekterfahrung von Applied Superconductor verifiziert werden.

## **7 Danksagung**

Das iSFCL Projekt zum Bau, Test und Feld-Installation eines induktiv geschirmten supraleitenden Strombegrenzers, mit der Projektnummer 03ET1003A, wird vom deutschen Wirtschaftsministerium gefördert.

Die Kerntechnologie wurde von AREVA T&D, heute Alstom Grid und Schneider Electric Infrastructure Business, entwickelt.

## **8 Referenzen**

[1] Cigré Working Group A3.10, 2003