

2 Stand der Technik

Aus der Literatur ist eine Vielzahl von Strombegrenzungseinrichtungen bekannt. Systembedingt liegt die Problematik aller Anordnungen in der Änderung des geringen Bahnwiderstands während des Nennbetriebs R_B zum „hochohmigen“ Zustand ($R_{el} > 100 \text{ m}\Omega$) in der Anfangsphase der Begrenzung in Zeiten kleiner 2 bis 3 ms. Bei Hochstromanwendungen ist weiterhin die Nennstromtragfähigkeit bzw. die Verlustleistung der Anordnung von Bedeutung. Bild 2.1 systematisiert verschiedene im Einsatz bzw. im Teststadium befindliche Strombegrenzungseinrichtungen [12].

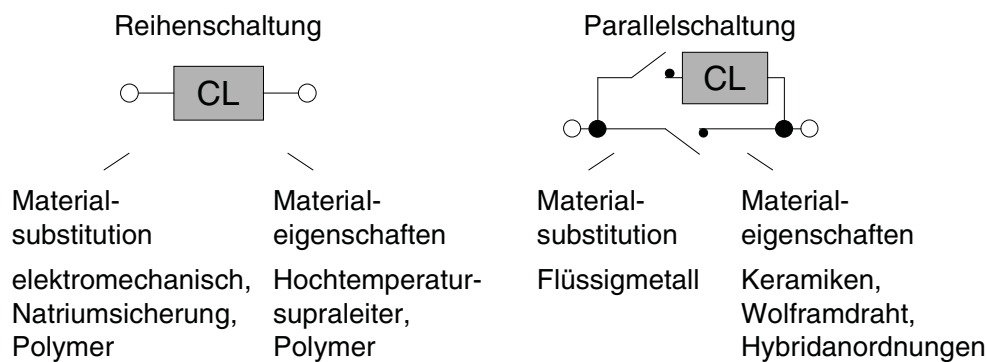


Bild 2.1: Systematisierung von Strombegrenzungseinrichtungen (CL = current limiter)

Genutzt werden Strombegrenzer sowohl in Reihen- als auch in Parallelschaltung zum Hauptstromkreis. Anordnungen in Reihe sind zumindest für Ströme bis zu einer Größenordnung von einigen hundert Ampere einfacher zu realisieren. Allerdings werden mit zunehmenden Bemessungsströmen I_r geringere Bahnwiderstände R_B erforderlich. Die hierzu notwendigen technischen Maßnahmen verschlechtern in der Regel das Strombegrenzungsverhalten.

Bei Parallelanordnungen erfolgt aus diesem Grund eine Funktionstrennung. Die Hauptstrombahn dient ausschließlich der Nennstromführung, während im Kurzschlussfall der Strom gezielt auf den Parallelzweig kommutiert und dort begrenzt wird. Der Kommutierungsvorgang erfordert ein extrem schnelles Öffnen der Hauptstrombahn. Dies ist insbesondere bei

größeren Bemessungsströmen nur mit Zusatzmaßnahmen möglich. Beispiele sind das Treiben eines Keils zwischen die Kontakte [19], das Nutzen einer flinken Sicherung als „Hauptstrombahnschalter“ [40] oder das Sprengen der Hauptstrombahn [31]. Aus elektrischer Sicht muss zur Kommutierung des Stroms der Widerstand im Hauptzweig immer größer als der des Nebenzweigs und die Induktivität im Parallelzweig zum Kommutierungszeitpunkt möglichst gering sein, um die Stromanstiegsgeschwindigkeit nicht zu begrenzen.

Weiterhin können Strombegrenzungsanordnungen nach ihrer Funktionsweise charakterisiert werden. Hierbei bildet die Ausnutzung bestimmter Materialeigenschaften zur Impedanzerhöhung ein grundlegendes Ordnungsprinzip. Es ist zu unterscheiden, ob die Impedanzerhöhung durch Änderung der Materialeigenschaften mit nur einem Material, z. B. durch Phasenübergänge, herbeigeführt oder ob das Material stufenweise substituiert wird.

Bei ausschließlichem Nutzen der Materialeigenschaften werden festmetallische oder keramische Werkstoffe verwendet, z. B. Wolfram [19] oder Hochtemperatursupraleiter [65]. Damit durch einen geringen Energieeintrag ein starker Widerstandsanstieg erreicht wird, kommen Materialien mit einem hohen Temperaturkoeffizienten, einer relativ geringen spezifischen Wärmekapazität und einem hohen Schmelzpunkt zum Einsatz. Andererseits wird durch die Schmelzwärme des Materials die mögliche umsetzbare Schaltarbeit begrenzt, da ansonsten Materialzerstörungen durch die Phasenumwandlung auftreten. In Hybridanordnungen ändert man die Materialeigenschaften durch Steuern der halbleitenden Zwischenschicht. Zu unterscheiden sind Einrichtungen, welche den Strom direkt steuern [41] bzw. Anordnungen, welche durch die Halbleiter einen Gegenswingkreis oder eine Gegenstromkommutierung freischalten [99]. Höhere Nennströme erfordern aufgrund der Verlustleistung durch den zweifachen pn-Übergang im Halbleiter ein extrem schnelles parallelgeschaltetes elektromechanisches Kontaktsystem zur Nennstromführung.

Die zweite Gruppe der Strombegrenzer nutzt die Materialsubstitution zum Erzeugen der Impedanzänderung. Es erfolgt ein zeitlich gestaffeltes Umschalten auf verschiedene Leitmedien. Klassische elektromechanische Schaltgeräte sind ein Vertreter dieser Gruppe und erreichen durch den Wechsel vom metallischen Leiter auf das Lichtbogenplasma zum Isolator eine enorme Widerstandsänderung von über zehn Größenordnungen ($< 1 \text{ m}\Omega \rightarrow > 10 \text{ M}\Omega$). Das Beschleunigen der Kontaktöffnungsbewegung

[86], das Maximieren des Energieentzugs aus dem Lichtbogen [13, 44] sowie die Optimierung der Plasmaströmung in der Schaltkammer [54] kennzeichnen hier die Entwicklung. Nachteilig wirken sich in elektromechanischen Strombegrenzern die zur Nennstromführung erforderlichen hohen Kontaktdruckkräfte sowie die relativ großen, im Kurzschlussfall zu bewegendenden Massen aus, so dass diese Technologie nur bis zu Nennströmen von ca. 630 A eingesetzt wird. Neueste Leistungsschalter nutzen anstatt einfach unterbrechender Kontaktapparate sogenannte Zweifachunterbrecher zur Optimierung der Strombegrenzungswirkung. Eine weitere Steigerung der Anzahl der Unterbrechungsstellen ist wegen des großen Raum- und Kostenaufwands derzeit nicht zu erwarten.

Elektrisch leitfähige Polymere nutzen nach neuesten Erkenntnissen sowohl Materialsubstitutionsprozesse als auch die Änderung von Materialeigenschaften. Ursprünglich wurden die Polymer-Compounds auf eine lichtbogenlose Funktionsweise konzipiert (Volumeneffekt [1]). Allerdings zeigte sich, dass Oberflächeneffekte, d.h. die Trennung des Polymers von der Elektrode im μm -Bereich bzw. oberflächliche Verdampfungen und dabei entstehende leitfähige Gase die Strombegrenzung bewirken [23, 93]. Aufgrund der schlechten Leitfähigkeit der Polymer-Compounds sind bisher nur Anwendungen bis ca. 100 A Nennstrom üblich.

Schaltgeräte welche Flüssigmetall, zumeist Quecksilber, als Leit- und Schaltmedium nutzten, wurden vorwiegend zwischen 1920 und 1960 entwickelt. Ein Aspekt war die Konstruktion rekombinierbarer Sicherungen. In definierten Engstellen verdampfte das Flüssigmetall und initiierte dadurch einen Lichtbogen. Stellvertretend für die Vielzahl an Bauformen sei [55] genannt. Bei dieser wurden bereits mehrere in Reihe geschalteter Unterbrechungsstellen realisiert.

Untersuchungen zu elektromagnetischen Kräften in flüssigen Leitern erfolgten bereits kurz nach der Jahrhundertwende. Die Versuchsanordnung enthielt zwei relativ große mit Flüssigmetall gefüllte Reservoirs, die durch eine horizontale, nach oben hin offene Engstelle verbunden waren. In Abhängigkeit der Stromstärke senkte sich der Flüssigmetallpegel in der Engstelle ab bzw. der Stromfluss wurde ganz unterbrochen. Durch systematische Experimente wurde mit diesem Aufbau erstmals die Wirkung der eigenmagnetischen Kompression (Pinchdruck) beschrieben [76].

Die erste zielgerichtete Entwicklung flüssigmetallischer Strombegrenzer erfolgte 1968 in den USA [37]. Motivation war die Schaffung von gekapselten Strombegrenzungsvorrichtungen für DC-Ströme in Bergwerken mit ho-

hen Spannungen und Nennströmen (600 V, 1000 A). Als Leitmedium wurde anfangs Quecksilber [37], später Natrium bzw. eine Natrium-Kalium-Legierung [38, 39] genutzt. Das Flüssigmetall befand sich in einem homogenen zylindrischen Kanal und kontaktierte beiderseitig die Festelektroden. Im Kurzschlussfall verdampfte das Leitmedium durch die hohe joulesche Verlustleistung, wodurch sich ein Lichtbogen ausbildete. Nach der Kurzschlussabschaltung rekombinierte das Leitmedium, so dass ihre Funktion weitgehend wieder hergestellt war. Zum Erreichen der applikationsbedingten 100 Abschaltungen wurden erstmals auch die Isolationskeramiken für diese Kanäle weiterentwickelt [52].

Anfang der 70-iger Jahre nutzte die Firma Mitsubishi diesen prinzipiellen Aufbau für das erste kommerzielle Produkt [71], welches sich aber wegen der hochgiftigen Materialien am Markt nicht durchsetzen konnte. Diese Anordnung war bis ca. 1989 Gegenstand umfangreicher Untersuchungen [48, 74, 81], die auf die physikalischen Abläufe während des Verdampfungsprozesses sowie den Aufbrand der Isolierstoffhülse zielten. Diese Hülse bildet den Trägerkanal für das Leitmedium und deren Durchmesser ist entscheidend für das Ansprech- und Begrenzungsverhalten.

Dieser konstruktive Aufbau war auch Ausgangspunkt für Arbeiten in der damaligen Sowjetunion [3, 62]. Allerdings wurde hier erstmalig die Flüssigmetalllegierung GaInSn verwendet. Grundlegende Materialuntersuchungen zu dieser Legierung erfolgten am Moskauer Institut für seltene Erden (GIREDMET) [50, 51]. Ein Zustandsdiagramm der Legierung ist in [28] angegeben. Weitere Untersuchungen bezogen sich auf das Beimengen von ferromagnetischen Pulvern zum Verstärken magnetisch induzierter Prozesse [53], die Strömungseigenschaften des Flüssigmetalls im Magnetfeld [7], das Oxidationsverhalten von GaInSn in Luft- und Vakuumatmosphäre bzw. bei überlagerten Flüssigkeiten zum Hemmen der Sauerstoffzufuhr [68] sowie das Benetzungsverhalten zu Isolatoren und Leiterwerkstoffen [73].

Für die direkte Fortsetzung der amerikanischen und japanischen Arbeiten eignete sich die Flüssigkeit jedoch wegen ihres hohen Siedepunkts von ca. 2000°C nicht. Experimentiert wurde mit separaten Verengungsstellen, ähnlich dem experimentellen Aufbau von [76]. In den Verengungsstellen entsteht ein vergleichsweise höherer lokaler Energieeintrag und somit ein lokales Verdampfen des Flüssigmetalls im Kurzschlussfall [5, 88, 95]. Der Verdampfungsprozess verringert den elektrischen Kanalquerschnitt, so dass ein lawinenartiger Prozess einsetzt, welcher in einer Trennung der Flüssigmetallfronten endet und einen Lichtbogen zündet. Weiterhin waren

die Anordnungen im Gegensatz zu den bisherigen nicht vollständig gefüllt, infolge dessen das Druckniveau erhalten und damit auch der Siedepunkt konstant bleibt. Zudem wiesen die Anordnungen mehrere im elektrischen Sinn seriell geschaltete Verengungsstellungen auf. Durch die serielle Anordnung dieser Diaphragmen werden entsprechend viele Lichtbögen initiiert und somit auch gute Strombegrenzungseigenschaften erreicht.

Weitere Anwendungen mit Flüssigmetallen bezogen sich auf Schalter für extreme Nennströme. Zeitlich parallel zu den russischen Arbeiten entwickelte die damalige Firma GEC einen Spezialschalter für die Stromversorgung von galvanischen Bädern (DC, Nennströme bis 400 kA), welcher jedoch mit einer Legierung arbeitete, die nur aus Gallium und Indium bestand [94]. Technisch interessant ist eine Anwendung aus dem Militärbereich, die eine mit 3 bis 4 MA stromdurchflossene Natrium-Kalium-Legierung als Antriebselement für Geschosse nutzt [70]. Das Flüssigmetall befindet sich zwischen zwei festmetallischen Zuleitungen, kontaktiert diese und bildet eine Stromschleife. Infolge der Lorentzkräfte wird das Flüssigmetall entlang der Zuleitungen beschleunigt und treibt dabei das Geschoss mit an. Für die Realisierung ist die gute Kontaktierung des Flüssigmetalls während der Bewegungsphase in der sich vergrößernden Stromschleife durch die liquiden Eigenschaften von Bedeutung.

Im Rahmen der Forschungen um den Tokamak-Fusions-Reaktor wurden Sicherungselemente auf Quecksilberbasis für DC-Ströme im Bereich einiger Mega-Ampere vorgestellt [45, 96]. Zur Strombegrenzung nutzte man zwar wiederum einen isolierenden keramischen Verengungskanal, allerdings konnte das Flüssigmetall beim Verdampfungsprozess in ein wassergefülltes Gefäß entweichen. Dadurch entsteht nur ein geringer Überdruck beim Aufheizen des Flüssigmetalls im Kanal und damit auch keine Änderung des thermodynamischen Materialverhaltens, so dass der Siedepunkt sich nicht ändert.

Die neuesten Arbeiten [4] befassen sich mit Öffnungsschaltern als Hilfsschalter beim Be- und Entladen magnetischer Energiespeicher in Pulsed-Power-Systemen (Energiespeicher, welche mit hochfrequenten Strömen bis zu 50 kHz be- bzw. entladen werden). Die benötigten Abschaltzeiten im Mikrosekundenbereich erreichte man bisher nur mit Sicherungen, die beim Abschalten aber explodieren. Um einen Schließschalter, der die Last mit dem Energiespeicher verbindet, durch eine Funkenstrecke zu zünden, benötigt man einen Spannungsimpuls. Dazu wird ein Quecksilberstrahl mit Überdruck auf eine Elektrode geschossen und damit die Energiequelle pa-