

ENTWURF EINER MITTELFREQUENZDROSSEL

G. Bühler

1 EINSATZBEREICH

Im Bereich der berührungslosen Energieübertragung (CPS[®] = Contactless Power Supply) werden für ein dem Primärwechselrichter nachgeschaltetes Filternetzwerk (vergl. **Bild 1**) Mittelfrequenzdrosseln (L_1 , L_2) für Ströme um 320 A_{eff} benötigt.

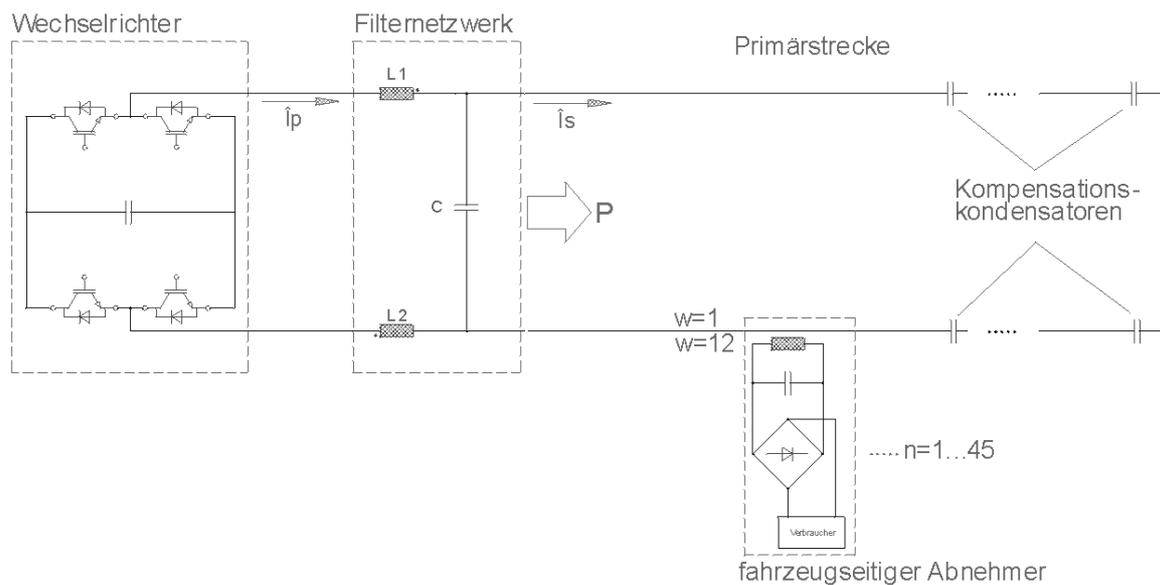


Bild 1: Prinzipieller Aufbau einer CPS-Anlage bestehend aus Primärwechselrichter, Filter, Strecke und sekundärseitigem Abnehmer

Durch geeignete Dimensionierung der Kondensatoren und Induktivitäten fungiert das Filter als Stromquelle für den zu versorgenden Streckenabschnitt und ermöglicht außerdem das resonante Schalten der Ventile im Wechselrichter mit der Folge drastisch verminderter Schaltverluste. Aufgrund des hohen Leistungsniveaus ist bezüglich des Wechselrichters ein modularer Aufbau in Form einer Parallelschaltung mehrerer kleiner Einheiten vorgesehen. Um die toleranzbedingten Abweichungen in der Synchronizität der Schaltzeiten abzufangen, ist der Einbau von symmetrierenden Drosseln ebenfalls unerlässlich. Das Schaltungskonzept zur Speisung der Primärstrecke besteht aus einem 1-Phasen-Wechselrichter und ist in **Bild 1** dargestellt. Hinzu kämen noch die Zusatzbelastungen durch den Unterschied der Schaltzeiten, welche hier jedoch unberücksichtigt bleiben sollen.

2 PROBLEMSTELLUNG

Aufgrund des hohen Leistungsniveaus bei der relativ hohen Frequenz von 20 kHz sind nur aus Einzelferriten zusammengesetzte Konstruktionen realisierbar, da die Wickelfenster und

Querschnitte fertiger Magnetkreise (U- oder PM-Kerne) zu klein sind. Ferromagnetische Werkstoffe aus eisenhaltigen Legierungen (Trafobleche etc.) scheiden wegen der hohen Hysterese- und Wirbelstromverluste bei 20 kHz von vornherein aus, so dass auch unter dem Gesichtspunkt möglichst geringer Fertigungskosten auf Weichferrite zurückgegriffen wurde.

Die Probleme beim Entwurf einer Drossel unterscheiden sich insofern von denen eines Transformators, als hier speziell im Bereich des Luftspaltes verstärkt Streufelder mit Flusskomponenten quer zur Hauptflussrichtung auftreten. Diese machen den Einsatz geblechtem Material praktisch unmöglich. Zunächst wurden diverse aus I-Kernen bestehende Varianten untersucht unter besonderer Berücksichtigung

- der erforderlichen Ferritmenge (Kosten und Masse),
- der darin auftretenden Flussdichte sowie
- der Verlustleistung und den Bedingungen zu deren Abfuhr,

wobei alle im Vergleich zu der hier vorgestellten ringförmigen Lösung schlechter abschnitten.

Grundsätzlich stellt die Luftdrossel aufgrund ihres linearen Verhaltens (keine Sättigungserscheinungen) sowie der kostengünstigen Herstellung eine gute Alternative dar, allerdings mit dem Nachteil eines relativ großen Streufeldes. Dies würde in benachbarten elektrisch leitfähigen Materialien (Gehäuseblech etc.) wärmeproduzierende Wirbelströme induzieren, so dass verhältnismäßig voluminöse Gehäuse vorzusehen wären.

Einen Kompromiss zwischen Ferrit- und Luftdrossel stellt die im Folgenden beschriebene Variante einer teilweise mit Ferritkernen umschlossenen Luftdrossel dar. Der Vorteil liegt in einer kompakten, relativ gut abgeschirmten Bauweise mit günstigen Kühlungsbedingungen.

Neben der reinen magnetischen Auslegung wurde eine Ferritkonfiguration angestrebt, welche die Anordnung der erforderlichen Induktivität als Reihenschaltung zweier geteilter, gegeneinander verschalteter, jedoch magnetisch gekoppelter Einzelinduktivitäten ermöglicht (stromkompensierte Drossel). Damit ergibt sich die Möglichkeit zur Unterdrückung von Gleichtaktsignalen, die auftreten könnten, wenn sich ein CPS-versorgtes Fahrzeug mit seiner relativ großen Fläche der Primärstrecke nähert. Dies wirkt elektrisch wie ein Kondensator, über welchen Verschiebungsströme Richtung Erde fließen würden. Des Weiteren sorgt die gegenphasig angeordnete zweite Drossel für eine teilweise Kompensation der Streufelder.

3 KONSTRUKTIVE GESTALTUNG

Zur Realisierung wurden sogenannte U93-Ferritkerne herangezogen, welche am Markt von unterschiedlichen Herstellern verfügbar sind. Der Kern besitzt die Außenabmessungen $93 \times 76 \times 30 \text{ mm}^3$ mit einer Ferritquerschnittsfläche von $28 \times 30 \text{ mm}^2$. Aus Gründen eines einfachen Aufbaus wurde eine Wasserkühlung, wie sie bei ähnlichen Anwendungen im Bereich der induktiven Erwärmung zur Anwendung kommt, nicht in Betracht gezogen. Durch eine ringförmige Anordnung (vgl. **Bild 2**) wird die Ferritaußenfläche gegenüber dem konzen-

trierten Aufbau eines aus I-Kernen zusammengesetzten großen U's erheblich vergrößert und die Kühlluft kann die Wicklung erreichen, so dass bei geeigneter Führung des Luftstromes die Kühlungsbedingungen verbessert werden. Sollte die so erzielte Kühlleistung nicht ausreichen, so sind zusätzliche flächenvergrößernde, in axialer Richtung durchströmte Aluminiumrippen, beispielsweise innerhalb des Innenkreises, vorgesehen.

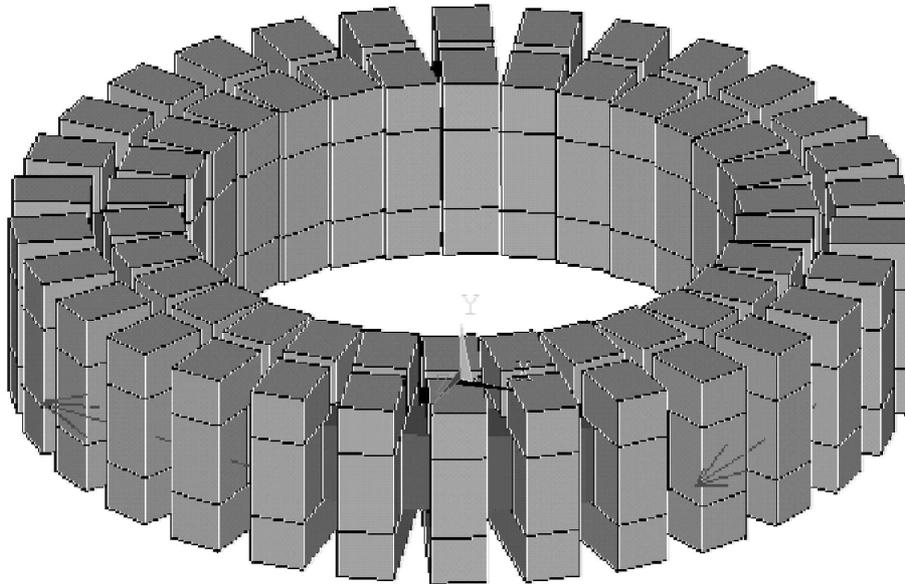


Bild 2: Gestaltungsbeispiel einer luftgekühlten, ringförmigen Drossel bestehend aus u-förmigen Weichferriten

Bild 2 zeigt den Entwurf einer solchen Drossel. Auf der Oberseite sind die Luftspalte zu erkennen, welche in erster Näherung als 9 mm breite Einzelspalte gerechnet wurden. Die Nenninduktivität wird bereits mit zwei Windungen erreicht. Bei der Nenndurchflutung beträgt die Maximalflussdichte im Ferrit etwa 310 mT (vgl. **Bild 3**). Die Wicklung soll aus feindrücker HF-Litze bestehen, um die Verluste durch den Skineneffekt bzw. das Luftspaltfeld zu minimieren. Sollte sich letzteres als zu groß erweisen, so besteht die Möglichkeit, den Gesamtluftspalt von 9 mm in mehrere kleine aufzuteilen, allerdings mit dem Nachteil höherer Fertigungskosten, da mehrere Sägeschnitte erforderlich wären. Im hier genannten Beispiel müsste ein zum U93-Kern passender I93-Kern mittig durchgesägt werden, wobei die beiden Hälften lediglich auf jeweils einen Schenkel des U's zu kleben sind. Um definierte Verhältnisse im Luftspalt zu erhalten, besteht die Möglichkeit, die jeweils nicht bearbeitete und damit plane Seite dem Luftspalt zuzuordnen und aus Stabilitätsgründen mit einem 9 mm starken Abstandshalter aus Kunststoff zu verkleben.

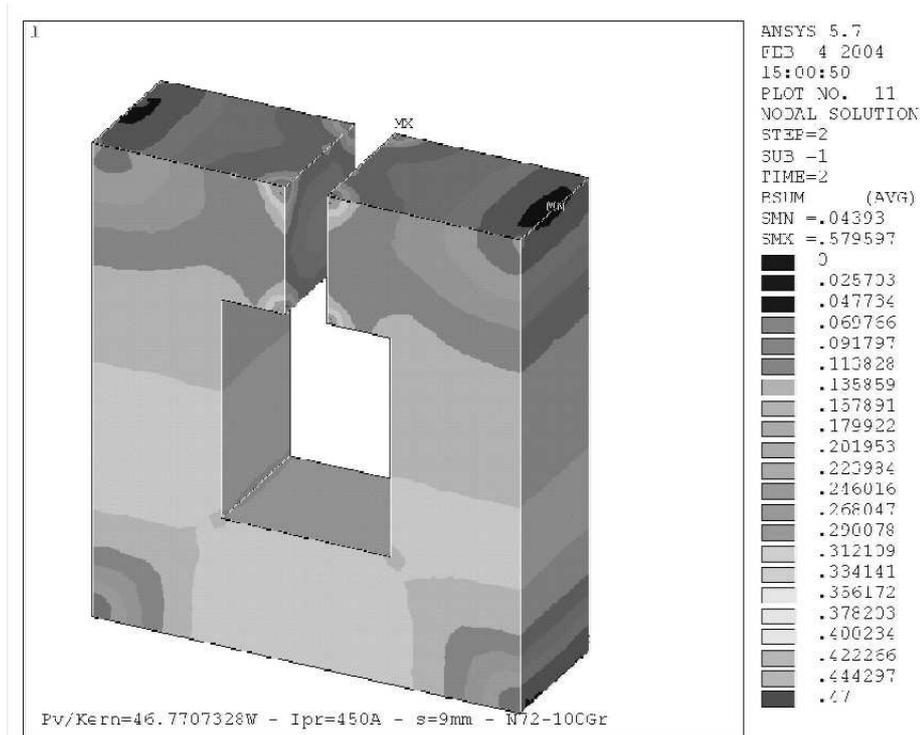


Bild 3: Schnitt durch einen der 30 Kerne mit Flussdichtewerten unter Berücksichtigung einer für das Material N72 (EPCOS) gültigen B/H-Kennlinie bei 100 °C Betriebstemperatur

Anhand der in den entsprechenden Datenblättern ausgewiesenen Werkstoffcharakteristika wurde ein Ausgleichspolynom ermittelt, mit dessen Hilfe die volumenspezifische Verlustleistung in Abhängigkeit vom Scheitelwert der Flussdichte, der Ummagnetisierungsfrequenz sowie der Werkstofftemperatur berechnet wurde. Durch elementweises Bestimmen der im Ferrit entstehenden Wärmeleistung und Integration über das Gesamtvolumen konnte bei einer eingesetzten Ferritmasse von 33 kg die Verlustleistung im Fall von N27 zu 133 W/Kern bei 20 °C ermittelt werden. Die meisten Ferrite sind jedoch so beschaffen, dass das Minimum der Verluste bei erhöhter Temperatur (70 °C - 100 °C) liegt. Ersetzt man die für diesen Bereich gültigen Kennwerte (B/H-Kurve, Verlustpolynom), so vermindert sich der Betrag bereits auf 92 W/Kern. Eine weitere deutliche Reduzierung dieses Wertes auf die Hälfte ließe sich durch die Wahl eines hochwertigeren Weichferrites wie beispielsweise N72 erreichen, wo bei 100 °C lediglich knapp 50 W/Kern anfielen (siehe **Bild 3**).

Um auch die Kupferverluste abzuschätzen, sind weitere Berechnungen speziell unter Berücksichtigung der Stromverdrängung im Leiter in der Nähe des Luftspaltes notwendig. Die zukünftigen Aktivitäten werden sich demzufolge auf dieses Gebiet beziehen.