

Automatisierte Optimierung von induktiven Bauelementen für Stromrichteranwendungen

Zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR-INGENIEUR
dem Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der
Universität - Gesamthochschule Paderborn
vorgelegte Dissertation
von
Dipl.-Ing. Peter Wallmeier
aus Verl

Referent: Prof. Dr.-Ing. H. Grotstollen

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. G. Mrozynski

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Dezember 2000

D-14-156

Paderborn 2001

Berichte aus der Elektrotechnik

Peter Wallmeier

**Automatisierte Optimierung von induktiven
Bauelementen für Stromrichteranwendungen**

D 466 (Diss. Universität-GH Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Wallmeier, Peter:

Automatisierte Optimierung von induktiven Bauelementen für
Stromrichteranwendungen / Peter Wallmeier.

Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus der Elektrotechnik)

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8777-4

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8777-4

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik an der Universität-Gesamthochschule Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Grotstollen, für die Anregungen und die Förderung der Arbeit und für die Übernahme des Referates.

Besonders bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Mrozynski für die Übernahme des Korreferates und das hierbei entgegengebrachte Interesse.

Wesentlich zu dem Gelingen dieser Arbeit haben die vielen Diskussionen mit meinen Studenten und Kollegen, natürlich ganz besonders mit Herrn Dipl.-Ing. Peter Ide und Dr.-Ing. Norbert Fröhleke, beigetragen. Ihnen möchte ich für ihr offenes Ohr meinen besonderen Dank aussprechen.

Für die wertvollen praktischen Anregungen und richtungsweisenden Vorschläge zur Anwendung der Methode möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Hermann Struck, ASCOM Energy Systems GmbH, und Herrn Dipl.-Ing. Holm Puder, Simec GmbH & Co. KG, danken.

Die Voraussetzungen für das Erstellen dieser Arbeit haben nicht zuletzt meine Eltern und meine Lebenspartnerin Melanie Vogt geschaffen. Für ihren Zuspruch und das aufgebrachte Verständnis sowie die Rücksichtnahme möchte ich mich bedanken.

Peter Wallmeier
Lippstadt, im März 2001

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Vorwort | II |
| Symbolverzeichnis | VII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation und Zielsetzung | 1 |
| 1.2 Gliederung der Arbeit | 4 |
| 2 Rechnergestützter Entwurf und automatisierte Optimierung | 6 |
| 2.1 Stand der Technik | 6 |
| 2.1 Darstellung des Gesamtsystems | 9 |
| 3 Anforderungen an induktive Bauelemente und ihre Klassifikation | 11 |
| 3.1 Transformatoren | 12 |
| 3.1.1 Elektrische Klassifikation und Abgrenzung | 12 |
| 3.1.2 Elektrische Anforderungen | 12 |
| 3.1.3 Mechanische Klassifikation | 14 |
| 3.2 Spulen | 15 |
| 3.2.1 Elektrische Klassifikation und Abgrenzung | 15 |
| 3.2.2 Elektrische Anforderungen | 18 |
| 3.2.3 Mechanische Klassifikation | 18 |
| 3.3 Mechanische Anforderungen | 18 |
| 4 Eigenschaften des magnetischen Kreises | 19 |
| 4.1 Magnetischer Leitwert des Kernes | 19 |
| 4.1.1 Berechnung der Formfaktoren in den Kernsegmenten | 21 |
| 4.1.2 Fazit und Anmerkungen zur Berechnung der geometrischen Größen | 26 |
| 4.2 Magnetischer Leitwert von Luftspalten | 26 |
| 4.2.1 Methoden zur Berechnung des magnetischen Leitwertes von Luftspalten | 26 |
| 4.2.2 Berechnung des Leitwertbelages durch konforme Abbildungen | 28 |
| 4.2.3 Magnetischer Leitwert eines Luftspaltes mit rechteckiger Querschnittsfläche | 35 |
| 4.2.4 Magnetischer Leitwert eines Luftspaltes mit runder Querschnittsfläche | 39 |
| 4.3 Ermittlung der magnetischen Flußdichteverläufe | 41 |
| 4.4 Temperaturabhängigkeit der Sättigungsflußdichte | 42 |
| 4.5 Berechnung der Kernverlustleistung | 43 |
| 4.5.1 Approximation von Herstellerkennlinien ohne Vormagnetisierung | 43 |
| 4.5.2 Approximation von Messungen mit Vormagnetisierung | 46 |
| 4.5.3 Kernverluste bei nicht-sinusförmiger Ummagnetisierung | 49 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.5.3.1 | Ein Ummagnetisierungszyklus pro Grundswingungsperiode | 49 |
| 4.5.3.2 | Mehrere Ummagnetisierungszyklen pro Grundswingungsperiode | 50 |
| 5 | Wicklungsverluste und Klemmenverhalten | 52 |
| 5.1 | Impedanzmatrix und Lagenverschaltung | 52 |
| 5.2 | Berechnung der Impedanzmatrixelemente von Mehrwicklungstransformatoren | 56 |
| 5.2.1 | Auswahl eines Feldberechnungsverfahrens, Stand der Technik | 56 |
| 5.2.2 | Ergebnisse der eindimensionalen Feldberechnung für Folienleiter | 60 |
| 5.2.2.1 | Näherungen und Annahmen | 60 |
| 5.2.2.2 | Scheinleistungsanteil der Leiterlagen und Stromverdrängungsfaktoren | 62 |
| 5.2.2.3 | Konsequenzen der Leitfähigkeitsmodifikation | 65 |
| 5.2.2.4 | Verallgemeinerung auf Lagen mit mehr als einer Windung | 67 |
| 5.2.2.5 | Anteil der Leiterlagen an den Elementen der Impedanzmatrix | 67 |
| 5.2.3 | Modifikationen für Lagen aus Runddraht | 68 |
| 5.2.3.1 | Innerer Skin-Effekt im freien, stromdurchflossenen Runddraht | 69 |
| 5.2.3.2 | Induzierter Skin-Effekt im freien, stromlosen Runddraht | 70 |
| 5.2.4 | Modifikationen für Lagen aus Hochfrequenzlitze | 72 |
| 5.2.5 | Anteile der Isolationslagen an der Scheinleistung | 77 |
| 5.2.6 | FEM-Parameterstudien zur Berücksichtigung von Randeffekten | 77 |
| 5.2.6.1 | Widerstandserhöhung durch das radiale Streufeld in Folienlagen | 77 |
| 5.2.6.2 | Erhöhung der Streuung durch Randeffekte | 79 |
| 5.2.7 | Anteile des magnetischen Kreises an der Scheinleistung | 80 |
| 5.2.8 | Gesamtscheinleistung und Impedanzmatrix | 80 |
| 5.2.9 | Berechnung der Wicklungsverluste von Transformatoren | 81 |
| 5.3 | Berechnung der Wicklungsverluste von Spulen | 82 |
| 5.3.1 | Vorbetrachtungen, Stand der Technik | 82 |
| 5.3.2 | Verlustleistungsberechnung mit eindimensionalem Feldansatz | 84 |
| 5.3.3 | Induzierte Wirbelstromverluste durch Feldaufweitung | 86 |
| 5.3.3.1 | Wirbelstromverluste in Runddrahtwicklungen | 87 |
| 5.3.3.1.1 | Das statische Feld innerhalb des Wickelfensters | 87 |
| 5.3.3.1.2 | Bestimmung der Oberflächenfeldstärken | 91 |
| 5.3.3.1.3 | Lösung der Skin-Gleichung in Rundleitern | 91 |
| 5.3.3.1.4 | Berechnung der Verluste | 93 |
| 5.3.3.2 | Wicklungsverluste in HF-Litzenwicklungen | 94 |
| 5.3.3.3 | Wicklungsverluste in Folienwicklungen | 94 |
| 5.3.3.3.1 | Vorbetrachtungen | 94 |
| 5.3.3.3.2 | Lösung des Feldproblems für Massivleitermodell | 98 |
| 5.3.3.3.3 | Berechnung der Verluste | 100 |
| 5.4 | Bestimmung von Ersatzzeigen- und Koppelkapazitäten | 102 |
| 5.4.1 | Eigenkapazität von Spulen | 102 |
| 5.4.1.1 | Eigenkapazität durch „innere elektrische Energie“ | 103 |
| 5.4.2 | Koppelkapazitäten eines Transformators | 105 |
| 5.4.3 | Umrechnung der Koppelkapazitäten in Klemmenkapazitäten | 106 |
| 5.5 | Schaltungsmodelle von Spulen und Transformatoren | 107 |
| 5.5.1 | Vorbetrachtungen, Stand der Technik | 107 |
| 5.5.2 | Spulen: Approximation von Impedanzverläufen | 108 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.5.3 | Transformatoren | 110 |
| 6 | Thermisches Modell | 114 |
| 6.1 | Stand der Technik, Vorbetrachtungen | 114 |
| 6.2 | Thermisches Modell mit zwei Temperaturnoten | 116 |
| 6.2.1 | Anteile der Wärmeleitung an den Ersatzwiderständen | 117 |
| 6.2.2 | Anteile der Wärmestrahlung an den Ersatzwiderständen | 118 |
| 6.2.3 | Anteile der freien und erzwungenen Konvektion an den Ersatzwiderständen | 118 |
| 6.2.4 | Bestimmung der Temperaturschwankung in der Wicklung | 121 |
| 6.2.4.1 | Wärmeübergangswiderstände zwischen den Lagen | 122 |
| 7 | Prüfung des Berechnungsmodells | 128 |
| 7.1 | Transformatoren | 128 |
| 7.1.1 | Transformator mit Runddrahtwicklungen | 128 |
| 7.1.2 | Transformator mit Litzenwicklungen | 130 |
| 7.1.3 | Transformator mit Folienwicklungen | 131 |
| 7.1.4 | Transformator mit Folien- und Runddrahtwicklung | 132 |
| 7.2 | Spulen | 134 |
| 7.2.1 | Spulen mit Runddrahtwicklung | 134 |
| 7.2.2 | Spulen mit Folienwicklung | 135 |
| 7.2.3 | Spulen mit Litzenwicklung | 136 |
| 7.3 | Abhängigkeit der Belastungsgrößen von parasitären Eigenschaften | 138 |
| 7.3.1 | Vorbetrachtungen | 138 |
| 7.3.2 | Exemplarische Untersuchung | 139 |
| 7.4 | Schlußfolgerungen | 144 |
| 8 | Formulierung der Optimieraufgabe | 145 |
| 8.1 | Der Parametervektor | 145 |
| 8.2 | Formulierung der Nebenbedingungen | 146 |
| 8.2.1 | Physikalische Nebenbedingungen | 146 |
| 8.2.2 | Geometrische Nebenbedingungen | 147 |
| 8.2.3 | Definitionsbereiche der Parameter | 147 |
| 8.3 | Formulierung der Zielfunktionen | 148 |
| 8.3.1 | Elementare Zielfunktion | 148 |
| 8.3.2 | Iterationen innerhalb der Zielfunktion | 148 |
| 8.3.3 | Klassifikation der Optimierungsaufgabe | 151 |
| 9 | Voroptimierung und Startwerte | 152 |
| 9.1 | Definition des Flächenproduktes | 152 |
| 9.2 | Voroptimierung von Transformatoren | 154 |
| 9.2.1 | Ermittlung des optimalen Flächenproduktes | 154 |
| 9.2.2 | Berechnung der Startwerte | 160 |
| 9.2.2.1 | Abmessungen des Kernes | 160 |
| 9.2.2.1.1 | Verfügbare Kerne | 160 |
| 9.2.2.1.2 | Nicht verfügbare Kerne | 161 |
| 9.2.2.2 | Parameter der Wicklung | 161 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9.3 | Voroptimierung von Spulen | 162 |
| 9.3.1 | Ermittlung des optimalen Flächenproduktes | 162 |
| 9.3.2 | Berechnung der Startwerte | 166 |
| 9.3.2.1 | Abmessungen des Kernes | 166 |
| 9.3.2.2 | Parameter der Wicklung | 166 |
| 9.4 | Vorauswahl eines Kerntyps | 167 |
| 10 | Optimieralgorithmen | 169 |
| 10.1 | Stand der Technik, Vorbemerkungen | 169 |
| 10.2 | Algorithmenauswahl | 169 |
| 10.2.1 | Lokal optimierende Algorithmen | 169 |
| 10.2.2 | Global optimierende Algorithmen | 169 |
| 10.2.3 | Multimodale, stetige Funktion | 170 |
| 10.2.4 | Multimodale, unstetige Funktion | 171 |
| 11 | Anwendung der Methode in Fallstudien | 173 |
| 11.1 | Optimierung eines Transformators | 174 |
| 11.2 | Optimierung einer Resonanzspule | 181 |
| 11.3 | Automatisierte Optimierung einer Filterspule | 183 |
| 12 | Zusammenfassung | 185 |
| 13 | Literaturverzeichnis | 187 |
| 14 | Anhang | 195 |
| 14.1 | Kelvin-Funktionen | 195 |
| 14.2 | Lösung der Skin-Gleichung für Folienleiter in einer röhrenförmigen Wicklung | 196 |
| 14.3 | Anteil der Leiterlagen an Impedanzmatrix | 199 |
| 14.4 | Berechnung der Kernkenngrößen unterschiedlicher Kernbauformen | 203 |
| 14.4.1 | U-Kern | 203 |
| 14.4.2 | UR-Kerne | 205 |
| 14.4.3 | E-Kern | 206 |
| 14.4.4 | ETD-Kern | 207 |
| 14.4.5 | EC-Kern | 208 |
| 14.4.6 | P-Kerne | 210 |
| 14.4.7 | PM-Kern | 212 |
| 14.4.8 | PQ-Kern | 215 |
| 14.4.9 | RM-Kern | 217 |

Symbolverzeichnis

Allgemeine Kennzeichnung

| | | | |
|-----------|----------------|-----------|----------------------|
| \vec{a} | a ist Vektor | a' | Belag von a |
| a | a ist Matrix | \bar{a} | Mittelwert von a |
| $ a $ | Betrag von a | \hat{a} | Scheitelwert von a |

Abkürzungen und Formelzeichen

| Abkürzung / Formelzeichen | Bezeichnung | Einheit |
|------------------------------|---|-----------------|
| 1D | eindimensional | ---- |
| 2D | zweidimensional | ---- |
| a | Temperaturleitfähigkeit | m^2/s |
| α | Winkel bzw. Skin-Konstante | $1/m$ |
| A | Magnetisches Vektorpotential oder Fläche | Vs/m o. m^2 |
| B | Magnetische Flußdichte | Vs/m^2 |
| b | Breite | m |
| $ber_n(x),$ $bei_n(x)$ | Kelvin-Funktionen 1. Gattung, n-ter Ordnung | ---- |
| C | Kapazität | As/V |
| $C_{k, pi, sj}$ | Koppelkapazität zwischen i-ter Primär- und j-ter Sekundärwicklung | As/V |
| C_1 | Kernformfaktor | $1/m$ |
| C_2 | Kernformfaktor | m^3 |
| C_S | Strahlungskonstante des schwarzen Körpers | $W/(m^2 K^4)$ |
| δ | Eindringtiefe | m |
| Δ | Differenzoperator, Laplace-Operator | ---- |
| d | Dicke oder Durchmesser | m |
| d_s | Durchmesser eines Einzelleiters in Litzen | m |
| d_K | Abstand Oberkante Lage zum Wickelkörper; er entspricht der halben Kriechstreckenlänge | m |
| d_L | Spiel zwischen Wickelkörper und Kern | m |
| d_W | Dicke des Wickelkörpers | m |
| ΔT | Temperaturerhöhung | K |

| Abkürzung / Formelzeichen | Bezeichnung | Einheit |
|------------------------------|--|-----------|
| e_r | Approximationskonstante für Bestimmung des thermischen Widerstandes aus dem Flächenprodukt G | ---- |
| ε_Z | Permittivität der Zwischenlagen | $As/(Vm)$ |
| ε_{eff} | Effektiver Emissionsgrad | $As/(Vm)$ |
| ES | Expertensystem | ---- |
| F_p | Verhältnis Kern- zu Gesamtverlustleistung | ---- |
| $F(x)$ | Gütefunktional | ---- |
| FEM | Methode der Finiten Elemente | ---- |
| FEA | Analyse mit der Methode der Finiten Elemente | ---- |
| $F_{sR,L}^{(R,L,F)}$ | Frequenzabhängige Faktoren durch inneren Skin-Effekt Hochindex: R: Runddraht; L: Litze; F: Folie Tiefindex: R: Widerstand; L: Induktivität bzw. Leitwert | ---- |
| $F_{pR,L}^{(R,L,F)}$ | Frequenzabhängige Faktoren durch induzierten Skin-Effekt Hochindex: R: Runddraht; L: Litze; F: Folie Tiefindex: R: Widerstand; L: Induktivität bzw. Leitwert | ---- |
| f | Frequenz | $1/s$ |
| γ | Winkel, Eigenwert | rad |
| $g(x)$ | Vektor der Nebenbedingungen | ---- |
| G | Flächenprodukt | m^4 |
| GUI | Grafische Benutzeroberfläche | ---- |
| H | Magnetische Feldstärke | m |
| h | Höhe | A/m |
| i | Strom | A |
| I | Lagenstromvektor | A |
| J | Stromdichte | A/m^2 |
| k | Konstante | ---- |
| k_b | Schenkelbreitenbezogene Luftspaltlänge | ---- |
| k_h | Schenkelhöhenbezogene Luftspaltlänge | ---- |
| k_K | Konstante, die Größen des Kerns zusammenfaßt | ---- |
| k_W | Konstante, die Größen der Wicklung zusammenfaßt | ---- |
| k_I | Verhältnis Amplitude Wechselanteil zur Gesamtamplitude, Verhältnis Isolation / Gesamtdurchmesser | ---- |

| Abkürzung / Formelzeichen | Bezeichnung | Einheit |
|------------------------------|---|-----------|
| k_F | Formfaktor der Frequenz | ---- |
| k_f | Kupferfüllfaktor | ---- |
| k_T | Formfaktor der Spannung | ---- |
| k_B | Sicherheitsfaktor für Flußdichte B | ---- |
| K | Strombelag, Anzahl an der Gütefunktion beteiligter Terme | A/m |
| K_1 | Leitwertfaktor für Luftspaltberechnung | Vs/A |
| K_2 | Exponent für magnetische Leitwertberechnung | ---- |
| $k_{A_w}, k_{V_K}, k_{l_m}$ | Approximationskonstanten für Bestimmung des Kernvolumens, Wickelfläche und mittleren Windungslänge aus Flächenprodukt | ---- |
| κ | Spezifische elektrische Leitfähigkeit | $A/(Vm)$ |
| L | Induktivität bzw. Anzahl der Leiterlagen | Vs/A |
| Λ | Magnetischer Leitwert des Kernes | Vs/A |
| λ | Thermische Leitfähigkeit | $W/(Km)$ |
| $\lambda_{eq}^{(R, L, F)}$ | Äquivalente thermische Leitfähigkeit Hochindex: R: Runddraht; L: Litze; F: Folie | $W/(Km)$ |
| l | Länge | m |
| m | Steigung | l/m |
| μ, μ_0 | Permeabilität des Vakuums | $Vs/(Am)$ |
| η | Füllgrad | ---- |
| N | Windungszahl bzw. Anzahl der Nebenbedingungen | ---- |
| N_s | Anzahl der Einzelleiter in Litzen | ---- |
| n | Dimension des Parametervektor x bzw. Windungszahlenverhältnisse, Anzahl, Ordnung | ---- |
| n. b. | Nicht bekannter Zusammenhang | ---- |
| P | Verlustleistung | VA |
| $P(g(x))$ | Bestrafungsfunktion der Nebenbedingung | ---- |
| p | Wicklungsverlustleistungsdichte, Eigenwert | VA/m^3 |
| φ | Winkel | ---- |
| Q | Blindleistung | VA_r |
| q | Wärmeströmungsdichte | VA/m^2 |

| Abkürzung / Formelzeichen | Bezeichnung | Einheit |
|------------------------------|--|-------------------------|
| R | Widerstand | V/A |
| r | Radius | m |
| R_{th} | Thermischer Widerstand | K/W |
| $R_{th}^{(t)}$ | Thermischer Widerstand durch tangentielle Strömung | K/W |
| $R_{th}^{(r)}$ | Thermischer Widerstand durch radiale Strömung | K/W |
| R_0 | Approximationskonstante für Bestimmung des thermischen Widerstandes aus Flächenprodukt | K/W |
| S | Scheinleistung | VA |
| s | Laplace Variable | ---- |
| t | Kerntiefe, Zeit | m bzw. s |
| T | Temperatur, Anzahl Qualitätswerte, Zeit | $^{\circ}C$, ----, s |
| T_N | Netzperiode | s |
| Θ | Magnetische Durchflutung | A |
| u | Elektrische Spannung | V |
| \ddot{u} | Spannungsübersetzungsverhältnis | V |
| U_{iso} | Geforderte Isolationsspannung | V |
| V_m | Magnetische Skalarpotential | A |
| V | Volumen | m^3 |
| w | Komplexe Variable | ---- |
| ω | Kreisfrequenz | rad/s |
| ω_v | Kreisfrequenz des v -ten Fourierkoeffizienten | rad/s |
| W | Anzahl der Wicklungen bzw. Summe aller Gewichte w_i , Energie | ----, VAs |
| x | Auf die Eindringtiefe bezogene Lagendicke, reelle Variable | ---- |
| \mathbf{x} | Parametervektor der Optimierung | ---- |
| Y | Admittanzmatrix | A/V |
| z | Komplexe Variable | ---- |
| $z_{i,j}$ | Impedanzmatrixelement der i -ten Zeile und j -ten Spalte | V/A |
| Z | Impedanzmatrix | V/A |

Indizes

| | | | |
|-------|---|-----------|---|
| a | axial, Außen- | n | Nenn-, Ordnung |
| AC | Wechselstrom- | N | Netz- |
| b | Bündel-, Bezugs- | opt | Optimal- |
| B | ... der Induktion | p | parallel, primär |
| c | Koerzitiv- | φ | in φ -Richtung |
| Cu | Kupfer- | P | parallel |
| DC | Gleichstrom- | R | Rückschluß-, widerstand- |
| eff | Effektivwert von | r | Remanenz-, in r-Richtung |
| e | Effektiv-, elektrisch Eigen- oder Exponent | RJ | Rückschluß-Joch- |
| eq | äquivalent | RR | Rückschluß-Rückschluß- |
| f | ... der Frequenz | σ | Streu- |
| Fe | Ferrit- | s | sekundär-, Schalt-, Einzelleiter- |
| h | Hüll- | sin | Sinus- |
| in | Innen- | S | Schenkel-, Serien-, Strömung-, Stör- |
| I | Isolation- | sat | Sättigungs- |
| J | Joch- | t | tangential |
| JS | Joch-Schenkel- | u | unverschaltet |
| k | Koppel-, Kurzschluß- | v | verschaltet, Verlust- |
| K | Kern- | W | Wickel- |
| KU | Kern-Umgebung | WU | Wicklung-Umgebung |
| KW | Kern-Wicklung | x | in x-Richtung |
| L | Leiter-, Lagen-, Luftspalt-, Induktivität- | y | in y-Richtung |
| m | Massiv- | z | in z-Richtung |
| M | Mittelschenkel-, Magnetischer Kreis | Z | Zwischen- |
| MJ | Mittelschenkel-Joch- | | |
| μ | Magnetisierungs- | | |