

# Wirkung von Kabelferriten oberhalb von 1GHz durch eine neue Betrachtung der elektrischen Parameter

Dr.-Ing. Moawia Al-Hamid<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Marco Leone<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Steffen Schulze<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Medizintechnik, O.-v.-G.-Universität Magdeburg, Deutschland

<sup>2</sup> Würth Elektronik eiSos GmbH, Waldenburg, Deutschland

## 1 Einleitung

Kabelferrite werden häufig auf Kabeln/Leitungen verwendet, um die Konformität elektronischer Geräte aus Sicht der EMV sicherzustellen. Bis heute verwenden Hersteller solcher Bauteile eine einfache Messprozedur, die nur einen Spezialfall für die Kabelterminierung bildet, der von den realen Anwendungen weit entfernt ist. Die Fehlinterpretation der verringerten Dämpfung oberhalb der Frequenz mit der maximalen Impedanz wurde in [1] korrigiert. Dort wurde ein neuer Ansatz für die Charakterisierung von Kabelferriten unter Zuhilfenahme eines geschlossenen TEM Wellenleiters vorgestellt, der in einem elektrischen Ersatzschaltbild mit einem repräsentativeren Satz von Ferritparametern resultiert. Die primären Ferritparameter wurden frequenzabhängig modelliert. Erweiterte Parameter wie der Propagationskoeffizient und die Ferritimpedanz geben einen Hinweis darauf, wie das Bauteil ein Störsignal bei unterschiedlichen Frequenzen bedämpft. Es wurde beobachtet, dass sich die effektive Dämpfung von MnZn- und NiZn-Ferriten bis in den Gigahertzbereich vergrößert. Das steht im Widerspruch zu der allgemeinen Interpretation der Impedanzkurven, die in den Datenblättern solcher Bauteile angegeben werden. Der in [1] entwickelte koaxiale Messadapter und der dazugehörige Auswertalgorithmus sind unter dem Aktenzeichen DE 10 2015 106 072.8 als Patent angemeldet.

In diesem Beitrag wurden, basierend auf den Ergebnissen der Methode aus [1], weitere Kabelferrite charakterisiert und die Wirkung dieser Ferrite auf die gestrahlte Störemission eines generischen Prüflings näher untersucht.

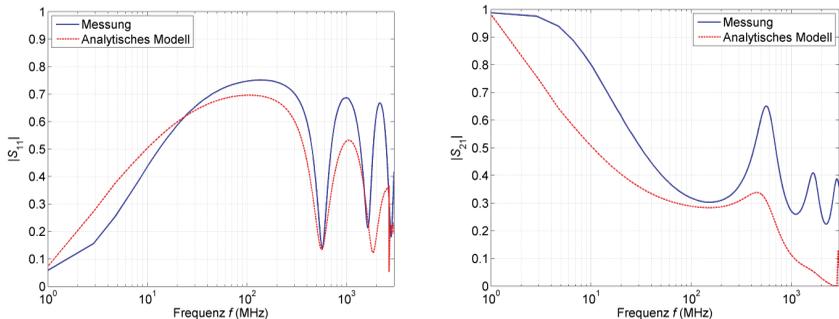
## 2 Ermittlung der Parameter weiterer Kabelferrite

In [1] wurden für zwei Kabelferrithülsen die Ferritparameter mit Hilfe der dort beschriebenen Messmethode und des dazugehörigen Algorithmus ermittelt. Für die neuen Untersuchungen wurden weitere Ferrithülsen sowie ein Klappferrit verwendet, deren Geometrie in Tabelle 1 beschrieben ist. Die Ferrithülsen WE-AFB haben eine zylindrische Form und der Klappferrit WE-STAR-TEC hat ein quadratisches Außenmaß.

Nr.	Serie	$\mu_{r,i}$	Außendurchmesser/Breite	Lochdurchmesser	Länge
1	WE-STAR-TEC	620	25 mm	13 mm	28 mm

2	WE-AFB	620	13,8 mm	6,1 mm	28,6 mm
3	WE-AFB	620	20,3 mm	11,4 mm	28,6 mm
4	WE-AFB	620	26 mm	12,6 mm	28,5 mm
5	WE-AFB	620	21,2 mm	13 mm	12 mm
6	WE-AFB	620	11,4 mm	4,6 mm	24,7 mm
7	WE-AFB	620	15,8 mm	8,8 mm	28,2 mm
8	WE-AFB	620	19,4 mm	11,6 mm	51 mm

**Tabelle 1:** Untersuchte Kabelferrite mit Anfangspermeabilität  $\mu_{r,i}$  und Geometrie. Beispielhaft sollen die ermittelten Ferritparameter für den Klappferrit angegeben werden. In Abb. 1. ist zunächst der Vergleich der Streuparameter, die bei der Vermessung des Bauteils innerhalb des in [1] beschriebenen koaxialen Messadapters aufgezeichnet wurden, mit dem analytischen Ferritmodell dargestellt. Obwohl die frequenzabhängige Permeabilität  $\mu_r(f)$  des Nickel-Zink-Materials berücksichtigt wurde, läßt sich keine bessere Anpassung des Modells an die Messung erzielen als in den Kurven sichtbar. Vor allem beim Transmissionsparameter  $S_{21}$  ist zu erkennen, daß das Modell über den gesamten Frequenzbereich von 1 MHz bis 3 GHz eine höhere Dämpfung suggeriert als in der Realität vorhanden; selbst, wenn die Resonanzen des TEM-Wellenleiters außer Acht gelassen werden. Dies liegt zum einen daran, daß der Frequenzverlauf der Permeabilität Schwankungen unterworfen ist und das Testmuster zur Bestimmung dieses Materialparameters nicht dem entspricht, welches für die hier dargelegten Untersuchungen verwendet wurde. Zum anderen ist das Modell für die exakte Nachbildung der Wellenleiterresonanzen zu einfach aufgebaut.



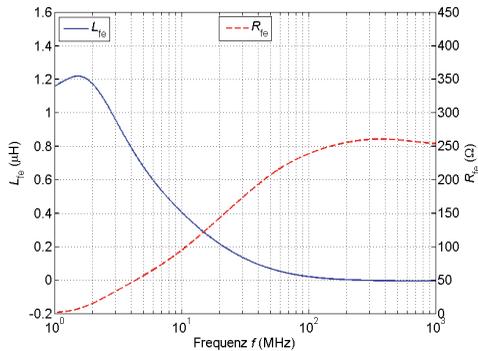
**Abb. 1:** Betrag zweier Streuparameter für den innerhalb eines koaxialen Messadapters befindlichen Ferrit 1; Vergleich zwischen Messung und Modell

In Abb. 2 werden die primären Ferritparameter  $R_{fe}$  und  $L_{fe}$  für den Klappferrit gezeigt. Während die Fähigkeit des Ferritmaterials zur Magnetisierung zu höheren Frequenzen hin nachläßt, erhöht sich der resistive Anteil durch die zunehmenden Wirbelstromverluste. Aus den primären Parametern lassen sich die sekundären Parameter Propagationskoeffizient  $\gamma_{fe}$  und Ferritimpedanz  $Z_{fe}$  wie folgt berechnen:

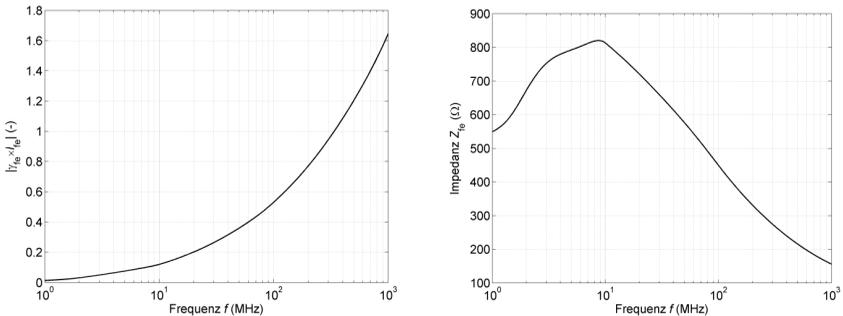
$$\underline{Y}_{fe} = \alpha_{fe} + j\beta_{fe} = \sqrt{(R'_{fe} + j\omega L'_{fe}) \cdot j\omega C'_{fe}} \quad (1)$$

$$\underline{Z}_{fe} = \sqrt{\frac{R'_{fe} + j\omega L'_{fe}}{j\omega C'_{fe}}} \quad (2)$$

Sie sind in Abb. 3 betragsmäßig aufgetragen. Dabei wurde der Propagationskoeffizient noch mit der Länge des Bauteils multipliziert und kennzeichnet damit für verschiedene Frequenzen den Exponenten, mit dem eine den Ferrit einmalig durchlaufende Welle gedämpft wird (Absorptionsdämpfung plus Phasendrehung).



**Abb. 2:** Primäre Ferritparameter für den Ferrit 1



**Abb. 3:** Sekundäre Ferritparameter für den Ferrit 1

Die Ferritimpedanz  $Z_{fe}$  stellt für ein Gleichtaktstörsignal auf dem Kabel einen Impedanzsprung dar, was zur teilweisen Reflexion des Signals führt und damit die Gesamtdämpfung des Ferrites zusätzlich erhöht (Reflexionsdämpfung).

### 3 Dämpfungsmodell für einen Kabelferrit

Für ausgedehnte Schirmwände gibt es ein Dämpfungsmodell nach Schelkunoff [2], welches die Dämpfungsanteile durch Absorption und Reflexion, sowie einen Korrekturterm, der die Mehrfachreflexionen innerhalb der Schirmwand berücksichtigt, beinhaltet. Das Modell kann für das elektrische und magnetische Nahfeld als auch für das elektromagnetische Fernfeld verwendet werden. Unter Vernachlässigung der Tatsache, daß ein Kabelferrit kein unendlich ausgedehnter Schirm aus Ferritmaterial ist, soll die Gesamtdämpfung  $A$  in Dezibel durch

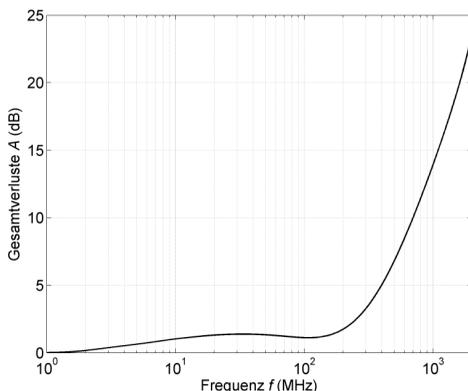
$$A = 20 \cdot \lg \left( \left( \frac{1}{(1+r_{fe,w}) \cdot (1+r_{w,fe})} \cdot e^{y_{fe}/l_{fe}} \cdot (1-r_{fe,w}^2 \cdot e^{-2y_{fe}/l_{fe}}) \right) \right) \text{ dB} \quad (3)$$

ausgedrückt werden. Dabei ist  $l_{fe}$  die Länge des Ferrits und  $r$  der Reflexionsfaktor beim Übergang von der Wellenimpedanz des Kabels  $Z_w$  auf die Ferritimpedanz bzw. umgekehrt; siehe Gleichung (4).

$$r_{fe,w} = \frac{Z_w - Z_{fe}}{Z_w + Z_{fe}} \quad (4.1)$$

$$r_{w,fe} = \frac{Z_{fe} - Z_w}{Z_{fe} + Z_w} \quad (4.2)$$

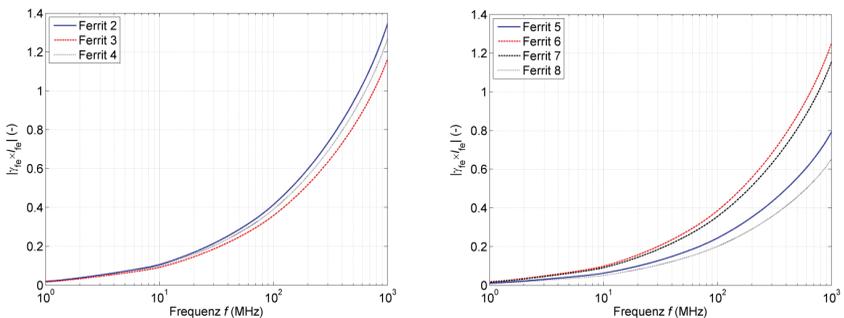
In Abb. 4 ist die Gesamtdämpfung für den Ferrit 1 angegeben. Er hat eine Länge von 28 mm. Es wurde angenommen, daß er sich auf einem Draht mit 1 mm Durchmesser befindet, welcher in 81 cm Höhe horizontal über einer leitfähigen Ebene verläuft. Diese Leitungsanordnung wird später für die Messung der Störaussendung eines an einem Rauschgenerator angeschlossenen Drahtes verwendet. Die Wellenimpedanz dieser Drahtleitung beträgt  $Z_w = 485 \Omega$ . Bei 1 MHz sind die Reflexionsfaktoren noch nahe bei Null; ebenso die Absorptionsverluste. Mit steigender Ferritimpedanz werden auch die Reflexionsverluste größer. Ab ca. 200 MHz bestimmen zunehmend die Absorptionsverluste die Gesamtdämpfung.



**Abb. 4:** Gesamtdämpfung für den Ferrit 1

## 4 Vergleich verschiedener Kabelferritgeometrien

Die in Tabelle 1 genannten Ferrite wurden unter verschiedenen Aspekten miteinander verglichen. Die Ferrite 2, 3 und 4 haben die gleiche Länge, aber unterschiedliche Wandstärken und damit Kernquerschnittsflächen. Wie Abb. 5 links verdeutlicht, ist der Betrag des Exponenten, der die Absorptionsdämpfung bestimmt, für alle drei Ferrithülsen ähnlich. Die Kernquerschnittsfläche ist nur dann entscheidend, wenn durch zu hohe Gleichtaktströme eine Sättigung des Ferritmaterials zu befürchten ist und wenn die Ferritwand nicht geschlitzt werden kann. Anders verhält es sich, wenn die Länge der Ferrithülse bei ähnlicher Wandstärke variiert wird (Abb. 5 rechts). Leider erlaubte die Ferritauswahl es nicht, auch den Lochdurchmesser gleich zu lassen. Deshalb hat der Ferrit 8 den geringsten Dämpfungsexponenten, obwohl er am längsten ist. Der Ferrit 6 hat den kleinsten Lochdurchmesser und dämpft dadurch das den Leiter umgebende Magnetfeld am besten, weil die Magnetisierung des Ferritmaterials höher ist. Damit wird die bereits bekannte Empfehlung bestätigt, den Lochdurchmesser dem Außendurchmesser des zu befilternden Kabels möglichst anzupassen.



**Abb. 5:** Vergleich des Betrags des Dämpfungsexponenten für Ferrithülsen verschiedener Wandstärke (links) und verschiedener Länge und Lochdurchmesser (rechts)

## 5 Störfeldstärkemessung an einem generischen Prüfling

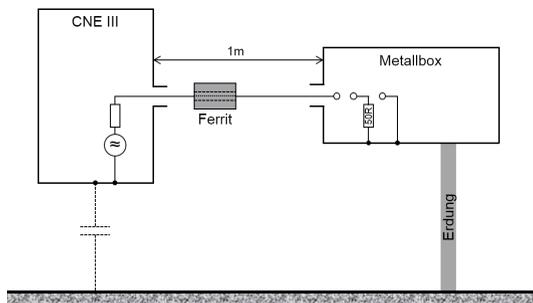
### 5.1 Messaufbau

Um die Wirkung eines Kabelferrites auf die Störaussendung eines Gerätes zu untersuchen, wurde ein generischer Prüfling verwendet (siehe Abb. 6). Dieser besteht aus dem batteriegespeisten Rauschgenerator York CNE III, einer allseitig geschlossenen Metallbox und einem Draht mit 1 mm Durchmesser und 1 m Länge, der die beiden Komponenten verbindet. Über eine koaxiale SMA-Durchführung wird der Draht in die Metallbox geführt und innen mit verschiedenen Abschlüssen versehen (Leerlauf,  $50 \Omega$ , Kurzschluss). Den gesamten Aufbau kann man sich so denken, daß der Generator ein zu untersuchendes Gerät darstellt, welches Störungen erzeugt und welches über ein geschirmtes Kabel an ein Hilfsgerät (hier: Metallbox) angeschlossen ist. Die unterschiedlichen – und hier einfach zu realisierenden – Abschlußimpedanzen sollen die einseitige Kontaktierung des

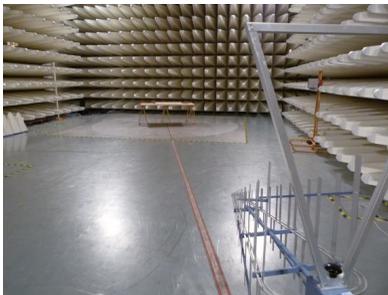
Kabelschirmes am Gehäuse des Hilfsgerätes vereinfacht nachbilden. Das Ziel dabei war, unterschiedliche Messaufbauten für die Bewertung der gestrahlten Störemission einfach zu realisieren.

Das Hilfsgerät kann auch geerdet sein. Erfahrungsgemäß können sich dadurch Störungen, die sich über angeschlossene Leitungen ausbreiten und abstrahlen, verstärken. Diese Konfiguration wurde ebenfalls untersucht. Schließlich wird die Wirkung des Ferrits Nr. 1 auf der Leitung in 10 cm (Anfang) und 45 cm (Mitte) Abstand zum Rauschgenerator bewertet.

Die Störfeldstärke von 30 MHz bis 2 GHz wurde in einer Absorberhalle in 10 m Entfernung ohne Bodenabsorber gemessen. Der Prüfling ist überwiegend horizontal ausgedehnt (siehe Abb.7) und wurde in 30° Schritten gedreht. Mit der Empfangsantenne wurde in horizontaler Ausrichtung der Bereich von 1 m bis 4 m Messhöhe durchfahren.



**Abb. 6:** Schema des generischen Prüflings



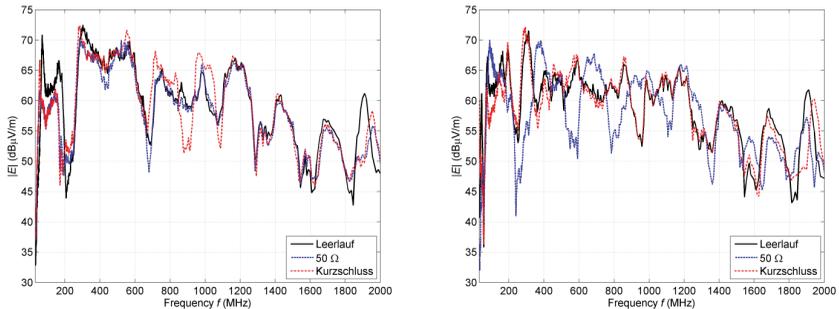
**Abb. 7:** Messaufbau in der Absorberhalle (links); Prüfling mit geerdeter Metallbox (rechts)

## 5.2 Messergebnisse ohne Ferrit

Das Maximum der Störfeldstärke für die geerdete und ungeerdete Metallbox zeigt Abb. 8. Im Fall der ungeerdeten Box traten Abweichungen bis zu 20 dB zwischen den unterschiedlichen Abschlüssen in unterschiedlichen kleineren Frequenz-

bereichen auf. Wird die Metallbox leitfähig mit dem Hallenboden verbunden, treten die Abweichungen zwischen den verschiedenen Terminierungen im gesamten Frequenzbereich auf.

Die Box ist ein kleiner Resonator. Im Fall des offenen Drahtendes (Leerlauf) ohne Erdung des Gehäuses werden Wirbelströme in den Gehäusewänden über die Transferimpedanz am Abschluss der Leitung erzeugt, während beim Kurzschluss die Seitenwände der Box mit dem aktiven Draht direkt verbunden sind. Wird die Box geerdet, verhält sich das Objekt anders. Hier wird es elektrisch gesehen länger, so dass unterschiedliche Abschlussimpedanzen mehr Auswirkung auf die Störaussendung des kompletten Systems über einen größeren Frequenzbereich haben.



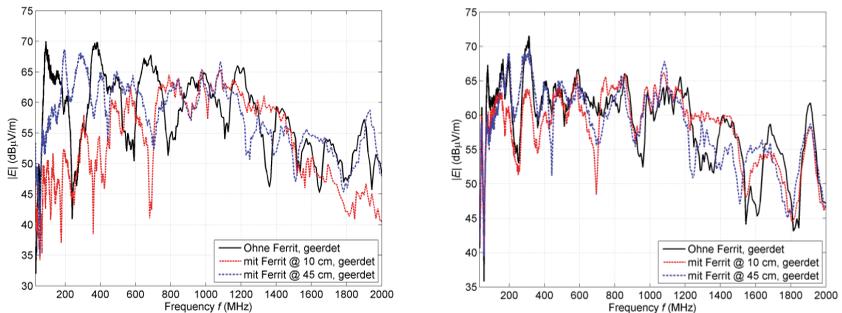
**Abb. 8:** Störemission ohne Ferrit bei verschiedenen Abschlüssen, Metallbox ungeerdet (links), geerdet (rechts)

### 5.3 Messergebnisse mit Ferrit Nr. 1

Zur messtechnischen Bestätigung der Wirkung der Kabelferrite oberhalb von 1 GHz wurde der Ferrit 1 in zwei Abständen (10 cm und 45 cm) vom Drahtanfang angebracht. Abb. 9 zeigt den Vergleich der Störemission mit und ohne Ferrit bei geerdeter Box und bei 50 Ω bzw. Leerlauf als Abschluss. Die Spektren zeigen deutlich, dass der Ferrit fast im gesamten Frequenzbereich dämpft. Es wurde auch bestätigt, dass eine nennenswerte Dämpfungswirkung noch oberhalb von 1 GHz vorhanden ist. Für den 50 Ω Abschluss und einem Ferritabstand von 10 cm beträgt die Dämpfung im niedrigen Frequenzbereich maximal ca. 30 dB, während im Frequenzbereich von 1,8 bis 2 GHz eine Amplitudenverringerung von bis zu 12 dB zu verzeichnen ist. Bei der Konfiguration mit offenem Drahtende wurde im Vergleich keine höhere Dämpfung erzielt. Die Ursache dafür liegt hauptsächlich in der Erhöhung der Kreisimpedanz der durch Drahtleitung und Erdung gebildeten Schleife, so dass der Anteil der Ferritimpedanz und damit auch die Dämpfungswirkung geringer ist.

In einigen Frequenzbereichen weist die Störfeldstärke mit dem Ferrit aufgrund der Leitungsresonanz höhere Werte auf. Es zeigt sich auch, dass das Anbringen des Ferrits direkt am Drahtanfang neben der Störquelle eine höhere ideale Dämpfung fast im gesamten Frequenzbereich ermöglicht. Wird der Ferrit in der Mitte des

Drahtes angebracht, dann tritt Dämpfung in den Frequenzbereichen auf, bei denen das Strommaximum auf dem Draht am Ort des Ferrites liegt (Abb. 9: ca. 1,1 GHz bis ca. 1,5 GHz).



**Abb. 9:** Störemission mit und ohne Ferrit, Metallbox geerdet, 50 Ω Abschluss (links) bzw. Leerlauf (rechts)

## 6 Zusammenfassung

Die Wirkung von Kabelferriten auf die gestrahlte Störemission eines generischen Prüflings wurde näher untersucht. Das Ergebnis der in einer Absorberhalle gemessenen Störfeldstärke im Frequenzbereich von 30 MHz bis 2 GHz zeigt, dass bei bestimmten Leitungsabschlüssen eine Dämpfungswirkung durchaus noch oberhalb von 1 GHz vorhanden ist. Dieses Ergebnis wurde basierend auf dem von uns zum Patent angemeldeten Mess- und Auswerteverfahren mittels eines Messadapters und erweiterten Ferritparametern sehr gut wiedergegeben. Der berechnete Propagationskoeffizient verschiedener Ferritmischungen, der maßgeblich den Absorptionseffekt bestimmt, nimmt dabei zu höheren Frequenzen kontinuierlich zu. Durch die neuartige Bewertung mittels der erweiterten Ferritparameter für verschiedene Materialien und Geometrien kann das für die Anwendung optimale Bauteil gefunden werden. Die Verwendbarkeit von Kabelferriten, speziell solcher aus Nickel-Zink-Material, bezüglich ihrer Dämpfung im Frequenzbereich oberhalb von 1 GHz wurde messtechnisch bestätigt.

## 7 Referenzen

- [1] M. Al-Hamid, M. Leone, S. Schulze, "A Novel Characterization Method for Cable Ferrites Using a TEM-Waveguide Test Setup", Proceedings of the EMC Europe 2015, Dresden, 16.-22. August 2015.
- [2] Schelkunoff, S. A.: „Electromagnetic waves“. D. van Nostrand Company Inc., New York, 1948