

Wirbelstrombremse

Eine **Wirbelstrombremse** (auch **Induktionsbremse**) ist eine verschleißfreie Bremse, die die Wirbelströme von Magnetfeldern in bewegten Metallscheiben (Rotoren) oder Schwertern zur Bremsung nutzt.

Das Prinzip: Bewegt sich eine Metallplatte in einem inhomogenen äußeren Magnetfeld, so werden in ihr Spannungen und in der Folge Wirbelströme induziert, die ihrerseits eigene, dem äußeren Magnetfeld gemäß der Lenzschen Regel entgegengesetzte Induktionsspannungen und damit wiederum ein eigenes Magnetfeld erzeugen, das die Platte schlussendlich abbremst (Lorentz-Kraft). Gleiches gilt, wenn umgekehrt die Quelle des äußeren Magnetfelds, z. B. ein Dauer- oder Elektromagnet, über eine elektrisch leitende Fläche, z. B. eine Eisenbahnschiene, bewegt wird – entscheidend ist lediglich die Relativbewegung zwischen Feld und elektrischem Leiter (siehe Abb.).

Der elektrische Widerstand der Metallplatte bildet dabei für die Wirbelströme einen ohmschen Verbraucher, der die Bewegungsenergie der Platte bzw. des Magneten in Wärme umsetzt. Die Magnetisierbarkeit der Metallplatte dagegen, die bei den ähnlich funktionierenden Hysteresebremsen eine Rolle spielt, ist für die Induktion in einer Wirbelstrombremse unerheblich, allein ausschlaggebend ist die elektrische Leitfähigkeit.

Die Idee der Wirbelstrombremse wurde 1892 patentiert.^[1]

Steuerung

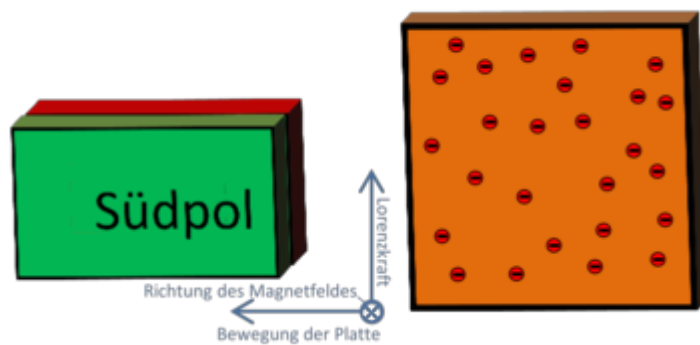
Die Stärke der Bremswirkung ist von mehreren Parametern abhängig:

- Leitfähigkeit der Bremsscheibe: Die induzierten Ströme sind direkt proportional zur elektrischen Leitfähigkeit des verwendeten Materials. Eine Kupferscheibe wird daher stärker abgebremst als eine baugleiche Stahlscheibe.
- Richtung des Magnetfeldes: Die größte Bremswirkung wird erzielt, wenn das Magnetfeld die bewegliche Scheibe senkrecht durchsetzt.
- Luftspalt: Je größer der Luftspalt, desto kleiner ist die maximale Bremswirkung.
- Form der Scheibe: Scheiben mit umfänglich kammförmiger Struktur oder Rissen weisen eine verringerte Bremswirkung auf, da sich die ringförmigen Wirbelströme nicht mehr großräumig ausbilden können.
- Fläche unter dem Erregerpol: Je kleiner die Fläche unter dem Pol ist, desto geringer ist die Bremswirkung.
- Geschwindigkeit: Die Bremswirkung ist stark von der Relativgeschwindigkeit zwischen Feld und Scheibe abhängig.
- Spulenstrom: Je höher der durch den Magneten fließende Strom ist, desto stärker wird das Magnetfeld und damit die Bremskraft.

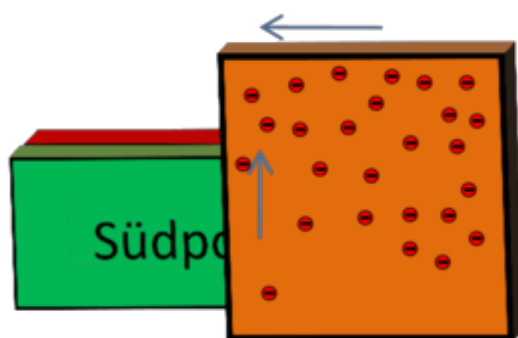
Wird eine rotierende Scheibe durch ein statisches Magnetfeld (z. B. Permanentmagnet) gebremst, so wird die Scheibe immer langsamer. Jedoch wird – wegen der Abnahme der Bremskraft mit der Relativgeschwindigkeit – der Stillstand theoretisch nie ganz erreicht. Eine Wirbelstrombremse eignet sich daher nicht als Feststellbremse.

Umgekehrt bietet dieser Effekt ein natürliches ABS. Diese Eigenart lässt sich durch ein veränderliches Magnetfeld beeinflussen, dann lässt sich sogar Bewegung erzeugen, wie z. B. beim Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer oder in Stromzählern nach dem Ferrarisprinzip.

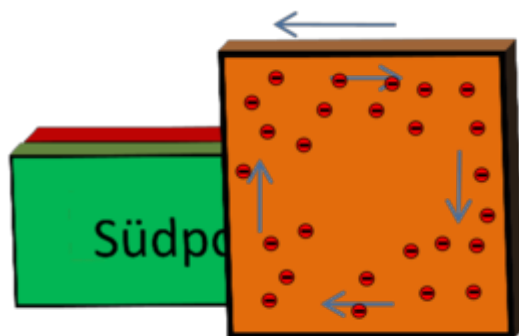
Entstehung der Wirbelströme



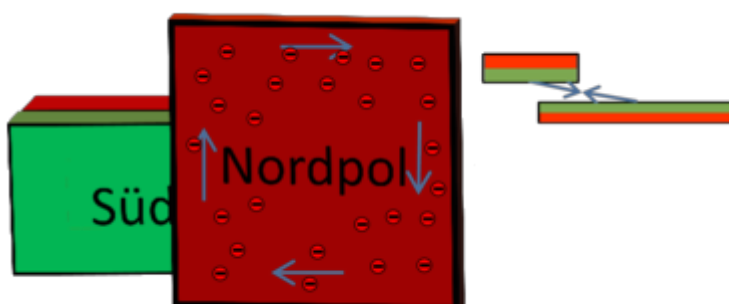
Eine nichtmagnetische, elektrisch leitfähige Metallplatte wird von rechts nach links (an diesem Beispiel o.B.d.A.) in ein nach hinten gerichtetes lokales Magnetfeld bewegt (z.B. Dauermagnet). Aus dieser Bewegung und der Richtung des Magnetfeldes resultiert nun eine nach oben gerichtete Kraft, die auf die noch gleichmäßig in der Platte verteilten Elektronen wirkt.



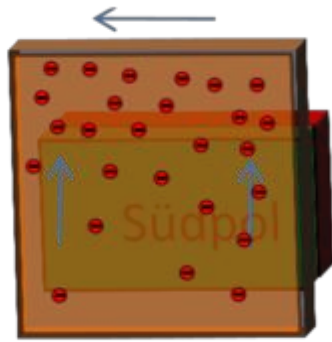
Diese sogenannte Lorentzkraft wirkt nun jedoch auf die Elektronen, die sich näher an dem Magneten befinden, stärker als auf die, die weiter von ihm entfernt sind. Dadurch entsteht auf der dem Magneten zugewandten Seite ein starker Elektronenfluss nach oben.



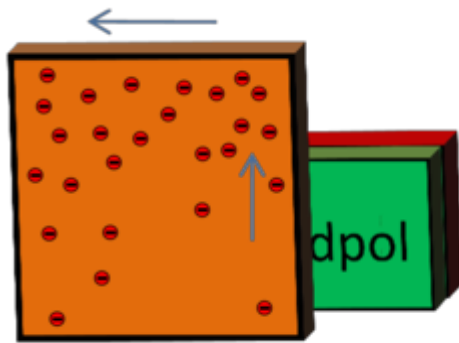
Um den dadurch entstehenden Ladungsunterschied in der Kupferplatte auszugleichen, fließen die Elektronen auf der rechten Plattenseite nach unten, da hier die Lorentzkraft geringer ist als auf der linken Seite. Auf diese Weise entsteht eine wirbelförmige Elektronenbewegung im Uhrzeigersinn.



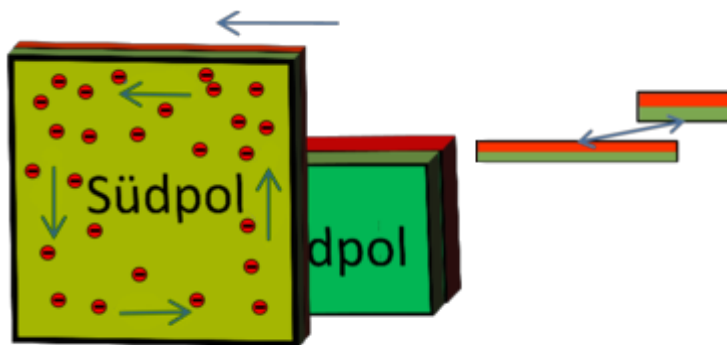
Diese Elektronenbewegung erzeugt nun wiederum ein Magnetfeld in der Kupferplatte, das dem des Dauermagneten entgegenwirkt. Die Abstoßung dieser Magnetfelder wirkt gleichzeitig auch der Bewegungsrichtung der Kupferplatte entgegen und bremst diese somit ab.



Befindet sich die Platte nun genau vor dem Magneten (in einem homogenen Magnetfeld), so wirkt die Lorentzkraft auf die Elektronen in der rechten Plattenhälfte genau so stark wie auf die in der linken Plattenhälfte. Es entstehen keine Wirbelströme mehr.



Beim Wiederaustritt aus dem Magnetfeld passiert nun genau das Gegenteil: Weil nun die rechte Seite stärker von dem Feld des Magneten durchsetzt wird als die linke Seite, wirkt hier auch die Lorentzkraft auf die Elektronen stärker. Die Elektronen fließen also nach oben und erzeugen einen Ladungsunterschied.



Dadurch entsteht nun wiederum ein Wirbel, nun jedoch gegen den Uhrzeigersinn, der ein Magnetfeld erzeugt, das dem des Dauermagneten gleichgerichtet ist. Diese magnetische Anziehung wirkt nun der Bewegungsrichtung der Kupferplatte entgegen.

Die Metallplatte wird also sowohl beim Eintritt, als auch beim Wiederaustritt aus dem Magnetfeld in ihrer Bewegung abgebremst. Die kinetische Energie wird nach dem Ohmschen Gesetz in thermische Energie umgewandelt (Die Kupferplatte erwärmt sich).

Anwendungen

Schienenfahrzeuge

Serienmäßig kam die **lineare Wirbelstrombremse** in Europa erstmals auf den ab 2000 in Dienst gestellten ICE-3-Triebzügen zum Einsatz. Im Gegensatz zu der bei schnell fahrenden Zügen sonst üblichen Magnetschienenbremse wird das Magnetfeld längs und nicht quer zur Schiene erzeugt. Der eiserne Kern des Elektromagneten setzt nicht auf, sondern wird durch Anbindung an die Radsatzlager etwa 7 mm oberhalb der Schienenoberkante gehalten. Problematisch ist dabei der Skineffekt, der durch die hohen Frequenzen den Wirbelstrom an die Außenränder des Schienenquerschnitts zwingt. Das soll in der Entwicklungszeit zum Ausglühen der Schienenoberfläche geführt haben. Bei der Wirbelstrombremse wird die abzuführende



Bremsenergie in den Schienen in Wärme umgewandelt. Die Wirbelstrombremse unterliegt keinem Verschleiß und arbeitet unabhängig vom Reibwert zwischen Rad und Schiene (z. B. bei Laub auf der Schiene).

Wirbelstrombremsen werden beim ICE 3 besonders bei hohen Geschwindigkeiten eingesetzt; sie können jedoch auch bis kurz vor dem Stillstand wirken. Um sie einsetzen zu können, müssen befahrene Strecken speziell ertüchtigt werden, insbesondere um Störungen der Sicherungstechnik zu vermeiden. In vollem Umfang, d. h. auch für Betriebsbremsungen, kommt die Wirbelstrombremse des ICE in Deutschland nur auf den Schnellfahrstrecken Köln–Rhein/Main und Nürnberg–Ingolstadt zum Einsatz, da nur durch den Einsatz der *Festen Fahrbahn* eine ausreichende Toleranz wärmebedingter Verwerfungen der Gleise sichergestellt werden kann.

Auf weiten Teilen des vom ICE 3 befahrenen Netzes darf die Wirbelstrombremse nur bei Schnellbremsungen zum Einsatz kommen. Sie kann dabei auf die Bremschwindstrecke des Zuges angerechnet werden und erlaubt (unter PZB) eine Geschwindigkeit von 160 km/h. Auf einzelnen Strecken, die nicht für den Einsatz der Wirbelstrombremse bei Schnellbremsungen ertüchtigt sind, wird sie nicht auf die Bremschwindstrecke des Zuges angerechnet, wodurch die zulässige Höchstgeschwindigkeit (unter PZB) auf 140 km/h beschränkt ist.

Vor dem Einsatz in den ICE-3-Reisezügen wurde das System der Wirbelstrombremse auf den Versuchsträgern ICE V und ICE S zur Serienreife geführt. Die Erprobung der Wirbelstrombremse des ICE 3 als Betriebs- und Schnellbremse unter LZB-Führung erfolgte ab Juli 2001 auf der Rheintalbahn zwischen Baden-Baden und Offenburg, später im Rahmen der Inbetriebnahme der Schnellfahrstrecke Köln–Rhein/Main.^[2] Im gleichen Jahr verkehrte ein einzelner ICE-3-Zug zwischen München und Hamburg, bei dem im höheren Geschwindigkeitsbereich die Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen zugeschaltet wurde.^[1]

Die Wirbelstrombremse des InterCityExperimental wurde aufgrund von Problemen mit der Infrastruktur zunächst nicht auf die späteren ICE-Serienzüge übertragen.^[1]

Bei der **rotierenden Wirbelstrombremse** wird die Schiene als Elektromagnet verwendet und Ströme in den Rädern des Zuges induziert, deren Magnetfelder Wechselwirkungen mit denen der Elektromagneten eingehen und so das Fahrzeug bremsen. Diese Bremse wird zurzeit nur in Versuchsfahrzeugen eingesetzt.

Leistungsbremse

Die Wirbelstrombremse wird als Leistungsbremse auf Motorenprüfständen eingesetzt. Sie dient der Abbremsung eines Prüflings (Verbrennungsmotor, Elektromotor). Den Vorteilen der guten Regelbarkeit, der Baugröße und der Nutzung als System zur Leistungsmessung stehen die Nachteile der Leistungsabführung in Form von Wärme und die nur passive Betriebsart entgegen (Prüfling kann nicht geschleppt werden).

Fitnessgeräte

Bei Trainingsgeräten, speziell bei hochwertigen Ergometern, erfolgt die Laststeuerung durch elektrisch einstellbare Wirbelstrombremsen. Durch Einsatz von Mikroprozessoren lassen sich diese vielfältig nach verschiedenen Parametern steuern.

Fahrgeschäfte

In den immer schneller und höher werdenden Achterbahnen und Freifall-Türmen werden zunehmend lineare Wirbelstrombremsen eingesetzt. Vor allem die im Vergleich zu den klassischen, auf der Wirkung von Reibung basierenden Klotzbremsen sanfter einsetzende Bremswirkung, die Verschleißfreiheit und die Sicherheit dieser Bremssysteme führten zu diesem Trend.

Wirbelstrombremsen mit Permanentmagneten benötigen keinen Strom. Deshalb funktionieren sie auch bei einem Stromausfall einwandfrei.

Je nach Wagentyp von Achterbahnen sind die Metallschwerter (meistens Kupferlegierungen) seitlich oder unterhalb der Wagen montiert. An den Bremspunkten bewegen sich die Schwerter zwischen an der Strecke montierten Permanentmagneten hindurch. Teilweise können die Magnete nach der Bremsung weggeklappt werden, um eine leichtere Weiterfahrt des Zuges zu ermöglichen.

Werden sehr hohe Geschwindigkeiten erreicht und dadurch viele beziehungsweise lange Bremsen eingesetzt, werden häufig die Magnete an den Achterbahnwagen und die Metallschwerter an der Schiene montiert. Der Grund liegt darin, dass Magnete in der Anschaffung deutlich teurer als die Bremsschwerter sind und so weniger davon benötigt werden. Diese Kombination findet man vor allem bei Abschuss-Achterbahnen, die teilweise mit Geschwindigkeiten von über 200 km/h fahren und bei denen herkömmliche Reibungsbremsen einen zu hohen Verschleiß aufweisen würden. Auch auf der Beschleunigungsstrecke sind bei solchen Bahnen Bremsschwerter montiert, die im Falle eines fehlerhaften Abschusses den Zug beim Zurückrollen bremsen, falls dieser nicht die nachfolgende Anhöhe passiert. Die Bremsschwerter werden dann während der Beschleunigungsphase abgesenkt oder nach unten umgeklappt und erst nach Passieren des Zuges wieder in Bremsposition gebracht. Absenkbare Bremsschwerter sind vor allem charakteristisch für „Accelerator Coaster“ von Intamin. Auch Abschuss-Achterbahnen, die mittels Linearmotor beschleunigt werden und dazu die Magnete am Wagen benötigen, weisen diese Kombination auf.

Bei Freifall-Türmen sind die Schwerter vertikal am Turm montiert und die Magnete am Fahrgastträger befestigt. Die Schwerter sind meist so montiert, dass auf dem Weg der Gondel zuerst wenige, nach unten hin mehr Schwerter vorhanden sind, um eine etwa konstant ansteigende Bremskraft zu erreichen.

Nutzfahrzeuge

Der Vorteil der verschleißlosen Dauerbremse wird auch im Nutzfahrzeugsbereich für LKW ausgenutzt. Die bekanntesten Hersteller sind Voith, Telma und Knorr-Bremse. Als Alternative zur Wirbelstrombremse werden auch *Retarder* eingebaut, die hydraulisch arbeiten. Einige Hersteller versuchen, Lichtmaschine, Anlasser und Wirbelstrombremse in einem Aggregat zusammenzufassen.

Messgeräte

In einem Drehspulmesswerk wird die bewegliche Spule – die sich in einem permanenten Magnetfeld bewegt – auf einen Aluminiumrahmen gewickelt. In diesem entstehen daher bei Zeigerbewegungen Wirbelströme, was ruckartige Zeigerbewegungen dämpft.

Beim Ferraris-Zähler (für elektrische Energie) erzeugen feststehende Strom- und Spannungsspulen einen Wirbelstrom, der eine drehbare Aluminiumscheibe in Bewegung versetzt. Die Scheibe durchläuft auch das Magnetfeld eines starken Permanentmagneten, der Wirbelströme in ihr erregt. Das Zusammenspiel der bremsenden und der antreibenden Kräfte bewirkt eine gleichmäßige und dem Messwert (elektrische Wirkleistung) proportionale Drehbewegung der Scheibe.

Quelle: <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Wirbelstrombremse>

Literatur

- Stefan Dörsch, Silvia Eickstädt, Christiane Nowak: *Einsatz der linearen Wirbelstrombremse in Fahrzeugen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs der DB AG – Erfahrungen und Perspektiven*. In: *Zevrail*, Jahrgang 133, Heft 10, Oktober 2009, S. 405 ff.

Einzelnachweise

1. ^{1,0 1,1 1,2} Peter Schmied 34. *Tagung „Moderne Schienenfahrzeuge“ in Craz*. In: *Eisenbahn-Revue International*, Heft 12/2002, ISSN 1421-2811, S. 558–560.
2. ⁺ Holger Schülke, Herbert Weishaar, Ottmar Grein: *Projekt PKX zur Inbetriebnahme der Neubaustrecke Köln–Rhein/Main*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, 50, Nr. 12, 2001, S. 736–747.

Fragen und Aufgaben zum Text:

- 1): Welche Wirkung hat ein Magnetfeld auf ein bewegtes Elektron?
- 2): Wie entstehen Wirbelströme?
- 3): Nenne Beispiele für die Anwendung der Wirbelstrombremse aus dem Alltag.
- 4): Beschreibe die Funktionsweise der Wirbelstrombremse.
- 5): Nenne Probleme / Nachteile der Wirbelstrombremse.
- 6): Könnte man die verwendete Technik auch als Antrieb verwenden?

1) Auf ein bewegtes Elektron in einem Magnetfeld wirkt die Lorentzkraft. Die Richtung der Lorentzkraft lässt sich mithilfe der Linken-Hand-Regel bestimmen.

2) Wirbelströme entstehen, wenn sich ein Teil eines Leiters in einem Magnetfeld befindet und ein anderer Teil nicht. Die Elektronen im Magnetfeld erfahren durch die Lorentzkraft eine Ablenkung wodurch dort ein Überschuss entsteht. Die Elektronen aus dem Teil außerhalb des Magnetfeldes rücken nun dorthin, wo die Elektronen durch die Lorentzkraft „vertrieben“ wurden. Sie werden dann auch von der Lorentzkraft abgelenkt und bewegen sich anschließend in den Teil außerhalb des Magnetfeldes. Dieser Vorgang wiederholt sich nun solange wie der Leiter in Bewegung ist und erzeugt einen Wirbelstrom.

3) ICE, Achterbahn, Fitnessgeräte, LKWs

4) Die Wirbelstrombremse macht sich nun das eben erklärte Prinzip der Wirbelströme zunutze. Wenn ein ICE zum Beispiel mithilfe der Wirbelstrombremse bremsen will, dann passiert das so: Der ICE hat einen Elektromagneten, der ganz knapp über den Schienen schwebt. Wird der Elektromagnet während der Fahrt angeschaltet, entsteht nun ein Magnetfeld. Ein Teil der Schiene befindet sich nun innerhalb des Magnetfeldes und ein Teil nicht. Dadurch kommt es zu der Entstehung eines Wirbelstroms. Dieser Wirbelstrom wiederum bildet nun ein Magnetfeld, das nach der Lenzschen Regel der Ursache entgegengesetzt ist. Die dort entstehende Lorentzkraft ist dann der Bewegungsrichtung des ICEs entgegengerichtet und führt so zu einer Abbremsung

5) - durch den Ohmschen Widerstand des Leiters entstehende Wärme
- Bremskraft abhängig von Geschwindigkeit

6) Wahrscheinlich schon, im Text ist die Rede von „Linearmotoren“. xD
YouTube schlägt dieses Video vor: https://youtu.be/v1sJ_fbxOKM