

In der modernen Elektrotechnik werden vier Mechanismen der elektromagnetischen Kopplung unterschieden. Diese werden anhand der Art der Störenergieübertragung von der Störquelle zur Störsenke klassifiziert.

Einer dieser Mechanismen ist die galvanische Kopplung, auch als Impedanzkopplung bezeichnet. Hierbei führen gemeinsame Koppelimpedanzen dazu, dass elektrische Ströme von Quelle und Senke eine Spannungsänderung hervorrufen, welche als Störung wirksam werden kann. Da im vorliegenden Fall keine leitfähige Verbindung zwischen einem Flugzeug als Quelle und einem Fahrzeug als Senke existiert, kann die galvanische Kopplung als Übertragungsweg ausgeschlossen werden.

In modern electrical engineering, a distinction is made between four mechanisms of electromagnetic coupling. These are classified according to the type of interference energy transfer from the interference source to the interference sink.

One of these mechanisms is galvanic coupling, also known as impedance coupling. Here, common coupling impedances lead to electrical currents from the source and sink causing a voltage change, which can become effective as interference. Since in this case there is no conductive connection between an aircraft as the source and a vehicle as the sink, galvanic coupling can be ruled out as a transmission path.

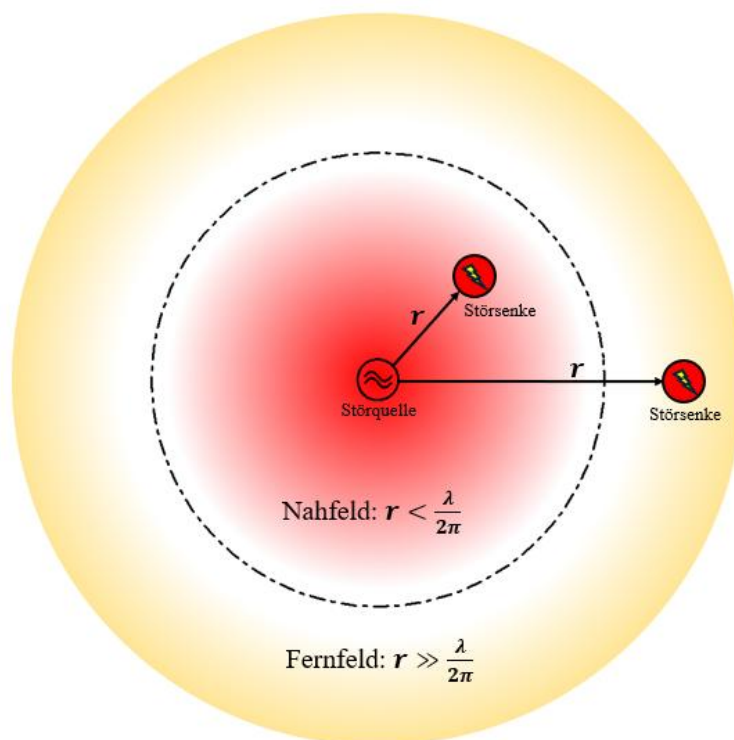


Abbildung 1
Schematische Darstellung von Nah-und Fernfeld

Figure 2
Schematic representation of near and far field

Die verbleibenden drei Kopplungsmechanismen können hingegen nicht unmittelbar ausgeschlossen werden. Zur Unterscheidung dieser Mechanismen ist die Wellennatur der elektromagnetischen Feldausbreitung im Raum zu berücksichtigen. Die Kopplungseffekte lassen sich in Abhängigkeit von Nah- und Fernfeldbereichen elektromagnetischer Wellen klassifizieren.

Das Nahfeld einer elektromagnetischen Welle wird durch $r < \frac{\lambda}{2\pi}$ definiert. Dies bedeutet, dass sich eine Störquelle innerhalb des Nahfeldes einer Störquelle befindet, wenn ihr Abstand zur Quelle kleiner als die Wellenlänge der Störwelle dividiert durch 2π ist. Im Nahfeld dominiert entweder das elektrische Feld oder das magnetische Feld, woraus sich die Unterscheidung zwischen kapazitiver Kopplung und induktiver Kopplung ergibt.

Der Fernfeldbereich, welcher für die Strahlungskopplung von Relevanz ist, wird durch die Bedingung $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ beschrieben. Im Fernfeld liegen das elektrische und das magnetische Feld in Phase. Es ist zu beachten, dass der Übergang zwischen diesen Bereichen kontinuierlich erfolgt, sodass eine exakte Abgrenzung nur annähernd möglich ist. Für praxisnahe Betrachtungen ist diese jedoch hinreichend genau.

Zur Bestimmung des Kopplungsmechanismus ist die Wellenlänge der eingekoppelten

However, the remaining three coupling mechanisms cannot be directly excluded. To differentiate between these mechanisms, the wave nature of electromagnetic field spread in space must be taken into account. The coupling effects can be classified depending on the near and far field ranges of electromagnetic waves.

The near field of an electromagnetic wave is defined by $r < \frac{\lambda}{2\pi}$. This means that an interference sink is located within the near field of an interference source if its distance to the source is smaller than the wavelength of the interference wave divided by 2π . In the near field, either the electric field or the magnetic field dominates, which results in the distinction between capacitive coupling and inductive coupling.

The far-field range, which is relevant for radiation coupling, is defined by the condition $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$. In the far field, the electric and magnetic fields are in phase. It should be noted that the transition between these areas is continuous, so that an exact demarcation is only approximately possible. However, this is sufficiently accurate for practical considerations.

The wavelength of the coupled interference is relevant for determining the coupling mechanism. The general formula for the wavelength λ is

Störung relevant. Die allgemeine Formel für die Wellenlänge λ lautet:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Dabei ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit im freien Raum $v = 3 \times 10^8$ m/s und f die Frequenz der Störwelle, welche im gegebenen Fall 400 Hz beträgt. Daraus ergibt sich:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{400 \frac{1}{s}} = 750000 \text{ m} \triangleq 750 \text{ km}$$

Zur Bestimmung des Feldbereichs wird diese Wellenlänge in die Bedingungen für Nah- und Fernfeld eingesetzt:

- Nahfeld: $r < \frac{750 \text{ km}}{2\pi}$
- Fernfeld: $r \gg \frac{750 \text{ km}}{2\pi}$

Flugzeuge im Landeanflug bewegen sich typischerweise in Höhen von 300 bis 900 Metern. Wird dieser Abstand als Distanz r zur Störsenke, also dem Fahrzeug, betrachtet, so ist dieser deutlich kleiner als die berechnete Nahfeldgrenze. Dies lässt den Schluss zu, dass die elektromagnetische Kopplung im Nahfeld erfolgt und somit die Bedingung für die Strahlungskopplung nicht erfüllt ist.

Folglich resultiert die elektromagnetische Störung entweder aus kapazitiver oder induktiver Kopplung innerhalb des Nahfeldes. Kapazitive Kopplung ist dabei durch die Interaktion elektrischer Felder mit Sensoren charakteristisch, während induktive Kopplung über magnetische Felder erfolgt. In Bezug auf die

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

The spread velocity in free space is $v = 3 \times 10^8$ m/s and f is the frequency of the interference wave, which in the given case is 400 Hz. This results in

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{400 \frac{1}{s}} = 750000 \text{ m} \triangleq 750 \text{ km}$$

To determine the field range, this wavelength is used in the conditions for near and far field:

- Near field: $r < \frac{750 \text{ km}}{2\pi}$
- Far field: $r \gg \frac{750 \text{ km}}{2\pi}$

Aircraft on approach typically fly at altitudes of 300 to 900 meters. If this distance is considered as the distance r to the interference sink, i.e. the vehicle, it is significantly smaller than the calculated near-field limit. This leads to the conclusion that the electromagnetic coupling takes place in the near field and therefore the condition for radiation coupling is not fulfilled.

Consequently, the electromagnetic interference results from either capacitive or inductive coupling within the near field. Capacitive coupling is characterized by the interaction of electric fields with sensors, while inductive coupling occurs via magnetic fields. Regarding the sensors concerned, it can be seen that

betroffenen Sensoren zeigt sich, dass kapazitive Sensoren, wie beispielsweise Beschleunigungssensoren, auf elektrische Felder ansprechen, während induktive Sensoren, darunter Hall-Effekt-Sensoren, primär auf magnetische Felder reagieren.

Zur präzisen Identifikation des Kopplungsmechanismus empfiehlt sich eine detaillierte Analyse der betroffenen Sensorik, beispielsweise durch deren gezielte Auswertung. Diese Erkenntnisse können als Grundlage für geeignete Entstörmaßnahmen dienen.

capacitive sensors, such as acceleration sensors, respond to electric fields, while inductive sensors, including Hall effect sensors, primarily react to magnetic fields.

In order to precisely identify the coupling mechanism, a detailed analysis of the affected sensors is recommended, for example by specifically evaluating them. These findings can serve as the basis for suitable interference suppression measures.