

# Volle Peilung

## Sicherer Empfang von 2,4 GHz- Fernsteuerungen

### **Roland Büchi**

*Im letzten Jahrzehnt hat bei den Fernsteuerungen im Modellbau eine eigentliche technische Revolution stattgefunden. Die vorher über fast ein halbes Jahrhundert dominierende MHz-Technologie wurde von der GHz-Technologie abgelöst. Frequenzabsprachen gehören damit der Vergangenheit an, da jede Fernsteuerung mit einer eigenen Sequenz aus unterschiedlichen aufeinanderfolgenden Frequenzen mit ihrem Empfänger kommuniziert.*

*GHz-Wellen weisen aber auch physikalisch andere Eigenschaften als MHz-Wellen auf. So gibt es auch Unterschiede bei den Sende- und Empfangseigenschaften dieser Fernsteuerungen. Dieser Artikel soll beschreiben, worauf der Modellbauer in der Praxis achten sollte, wenn er mit 2,4 GHz-Fernsteuerungen einen guten Empfang erreichen möchte. Dabei ist die Wahl des richtigen Standorts genauso wichtig, wie die Montage und die Ausrichtung der Antennen.*

### Reichweite und Signalschwund

Fernsteuerungen senden elektromagnetische Wellen aus, welche sich bildlich ähnlich ausbreiten, wie wenn man einen Stein ins Wasser wirft. Dort bilden sich an der Oberfläche kreisförmige Wasserwellen aus, welche sich vom Zentrum weg bewegen und dabei immer schwächer werden. Bei einem gewissen Abstand kann man die Welle nicht mehr von blossem Auge erkennen. Bei den elektromagnetischen Wellen verhält es sich ähnlich, nur breiten sich die Wellen im ganzen Raum aus. Der Abstand zum Sender, bis zu welchem der Empfänger die Welle als Signal detektieren kann, wird Reichweite genannt. Diese wird bei den meisten gängigen Fernsteuerungen etwa mit mindestens 1km bis 2km angegeben. Das ist für die Anforderungen im Modellbau mehr als ausreichend.

Die Reichweite ist jedoch eigentlich nur von theoretischem Interesse und deshalb für sich alleine zu wenig aussagekräftig, da in der Praxis auch noch andere Faktoren den sicheren Empfang beeinflussen. Viel wichtiger ist es deshalb, dass der Empfang innerhalb des praktischen Abstandes zwischen dem Sender bzw. Piloten und dem Empfänger bzw. Modell überall und vor allem auch zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist, auch unter der Berücksichtigung von Reflexionen am Boden oder bei Hindernissen. Beides ist für den Modellbau sehr wichtig. Automodelle bewegen sich ja immer am Boden. Andererseits gehören auch Hindernisse oder auch einmal eine unebene Bodenbeschaffenheit für Off- Road- Modelle zu den Normalbedingungen. Die Fernsteuerung muss aber in jedem dieser Fälle zuverlässig funktionieren.

Da der Einfluss von allen diesen Faktoren bei den sich immerzu bewegenden Modellen ständig wechselt, ändert sich auch die Signalstärke beim Empfänger ständig. Dieser Effekt wird auch Signalschwund genannt. Es muss ja immer ein minimales Empfangssignal vorhanden sein und unter Berücksichtigung aller Faktoren muss immer das schlechtest Mögliche als Mass angenommen werden.

### Funkschatten

Wie die 2,4 GHz- Funkwellen, ist auch das Licht eine elektromagnetische Welle. Man kann deshalb viele Eigenschaften phänomenologisch mit dem Verhalten von Licht vergleichen. Über das sichtbare Licht und dessen Verhalten verfügt jeder sehende Mensch im täglichen Leben über eine umfangreiche Praxiserfahrung. Beispielsweise weiss jeder, dass es einen Schatten gibt, wenn Licht auf ein Objekt trifft. Bei den 2,4 GHz- Wellen nennt man das auch einen Funkschatten oder ein Funkloch.

Es stellt sich die Frage, was für ein Vergleich denn mit den Wellen einer 27 MHz- oder 40 MHz-Fernsteuerung angestellt werden könnte. Es kommt als Vergleich das Verhalten von Wasser in Frage. Es handelt sich dabei selbstverständlich nicht um eine elektromagnetische Welle, aber es ist auch etwas, das der Mensch mit seinen Sinnen erfassen kann. Stellt man sich vor, dass Wasser einem Bach hinunterfliesst und dabei auf einen Stein als Hindernis trifft, dann umschliesst es diese Lücke sofort unterhalb dieses Steines.

Der Unterschied in den Vergleichen kommt wegen der unterschiedlichen Wellenlänge zustande. Diese berechnet sich bei 2,4 GHz zu Wellenlänge  $\lambda = \text{Lichtgeschwindigkeit} / \text{Frequenz}$  also  $\lambda = 300'000'000 / 2'400'000'000 \text{ m} = 0,125\text{m}$  oder 12,5cm. Bei 27 MHz berechnet sich  $\lambda$  zu  $300'000'000 / 27'000'000 \text{ m} = 11\text{m}$ . Da die Lichtwellen noch viel kürzer sind als die GHz- Wellen, kann man deshalb so argumentieren, dass sich 2,4 GHz- Wellen eher ähnlich zum Licht verhalten und die die MHz- Wellen eher ähnlich zum Wasser. Was das in der Praxis für den Modellbauer heisst, zeigen die Abbildungen.

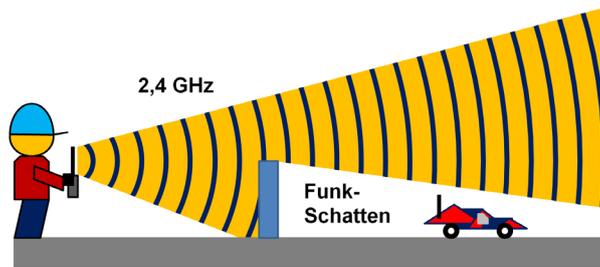


Abb.1 Funkschatten mit 2,4 GHz- Steuerung

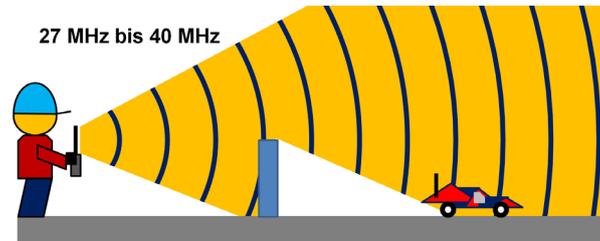


Abb.2 Funkschatten mit MHz- Steuerung

Die Darstellung, welche die 2,4 GHz- Wellen beschreibt, wirft einen relativ langen Funkschatten, eben ähnlich wie derjenige welcher entsteht, wenn Licht auf das Hindernis trifft. Die andere Darstellung, zeigt das Verhalten der MHz- Wellen. Wasser würde die Lücke hinter dem Hindernis sofort wieder schliessen. Die MHz- Wellen tun dies zwar nicht ganz unmittelbar, jedoch ist der Funkschatten deutlich kleiner als bei den 2,4 GHz- Wellen. Das führt uns für die 2,4 GHz- Fernsteuerungen auf eine Faustregel betreffend des Sichtkontakts:

*Besteht zu einem Modell und dessen Antenne Sichtkontakt, ist der sichere Empfang in der angegebenen Reichweite grundsätzlich gewährleistet, da die GHz- und die Licht- Wellen einander ähnlich sind. Vorsicht ist immer bei Hindernissen zwischen dem Sender bzw. dem Piloten und dem Empfänger bzw. dem Modell geboten. Ähnlich, wie der Pilot das Modell hinter den Hindernissen nicht sehen kann, kann auch der Empfänger die Signale nur schlecht ‚sehen‘. Es entsteht ein Funkschatten.*

#### Materialdurchdringung

Der Vergleich der 2,4 GHz- Wellen mit Licht hat jedoch speziell bei der Durchdringung von festen Materialien auch einige Einschränkungen. Modelle mit geschlossenem Chassis lassen ja überhaupt kein Licht durch. In deren Inneren ist es deshalb immer dunkel. Sehr gut muss man bei den CFK- Materialien (Kohlefaserverstärkter Kunststoff) oder Carbon achten. Die Materialdurchdringung der 2,4 GHz- Wellen ist dort sehr schlecht. Die Antenne sollte deshalb immer an der Aussenseite des Modells montiert werden.

Die Länge der Antenne ist so ausgelegt, dass sie freistehend den besten Empfang gewährleistet. Wenn sie sich in der Nähe von solchen Materialien befindet oder auch wenn sie im Modell in der Nähe von Kupferleitungen verlegt wird, ist es auch möglich, dass sie elektrisch verstimmt wird. Das hat dann ebenfalls zur Folge, dass die Empfangssignale schwächer werden.

#### Fresnel Zone

Hindernisse und sich daraus ergebende Funkschatten sind aber nicht das einzige, was den sicheren Empfang beeinflusst. Zuerst stellt sich die Frage, wie viel ‚Luft‘ oder wie viel ‚Raum‘ denn überhaupt nötig ist, um ein Signal zuverlässig von einem Punkt zum anderen zu übermitteln. Dies kann mit der ‚Fresnel Zone‘ erklärt werden.

Die Fresnel Zone ist eine Ellipse, in deren Brennpunkten sich jeweils die Sender- und Empfängerantenne befinden. Die Fernsteuerung mit vertikal gestellter Stabantenne strahlt in direkter Richtung zum Modell, also entlang der Linie d (für Distanz) mit der maximalen Feldstärke ab. Es existiert jedoch auch eine etwas schwächere Abstrahlung in Richtung der Linie a. Nimmt man einmal an, dass sich zufällig gerade ein Objekt, wie beispielsweise der Boden, genau am Rand dieser Fresnel- Zone befindet, wo die elektromagnetische Welle a auftritt, dann wird sie bei richtiger Topografie in Richtung des Modells reflektiert. Die Welle, welche die Distanz a+b zurücklegen muss, hat bis zum Modell einen längeren Weg als die Welle, welche nur d zurücklegen muss. In der Fachsprache nennt man diesen Effekt auch ‚Auslöschung‘ oder ‚Destruktive Interferenz‘.

Grundsätzlich bewirkt jede Welle, welche innerhalb der Fresnel- Zone reflektiert wird, dass beim Modell eine grössere oder kleinere Abschwächung der direkten Welle ankommt. Somit lässt sich folgender Merksatz herleiten:

*Wenn die Fresnel- Zone frei ist von Hindernissen und auch der Boden nicht in den Weg kommt, dann ist der sichere Empfang innerhalb der angegebenen Reichweite der Fernsteuerung gewährleistet.*

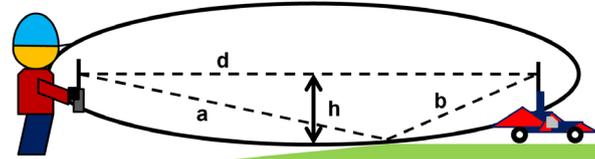


Abb.3 Fresnel Zone mit erhöhter Empfangsantenne

Die Höhe  $h$  der Fresnel Zone ist vom Abstand zwischen Fernsteuerung und Modell abhängig. Für 2,4 GHz- Fernsteuerungen beträgt sie bei 50m Abstand 1,25m und bei 100m Abstand 1,75m. Im Idealfall sollte die Empfangsantenne im Modell so weit oben wie möglich montiert werden. In der Praxis ragt aber die Fahrbahn immer mehr oder weniger stark in die Fresnel Zone hinein. Die dargestellten ‚Seitenwellen‘ werden dann beide innerhalb der Fresnel Zone reflektiert und tragen wegen obiger Ausführungen beide zur Verschlechterung der Empfangsqualität bei.

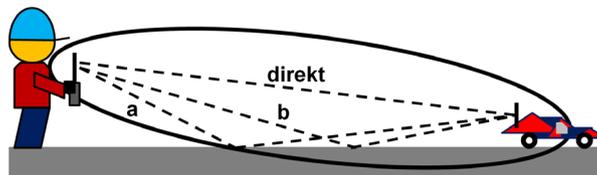


Abb.4 Fresnel Zone im realen Fall

Um das Empfangssignal zu verbessern, muss man immer darauf achten, dass der Boden möglichst wenig in die Zone hineinragt. Dazu nützt hier einerseits ein erhöhter Standort des Modellpiloten oder eben die erhöhte Antennenmontage beim Empfänger.

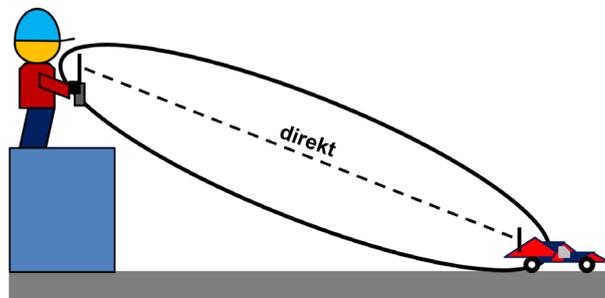


Abb.5 Fresnel Zone bei erhöhtem Standort des Piloten



Abb.6 Erhöhter Standort der Piloten in der Praxis

Ein erhöhter Standort des Piloten verbessert also nicht nur die Sicht, sondern sie ist auch im Hinblick auf eine möglichst freie Fresnel Zone von Vorteil.

#### Antennenausrichtung

Senkrecht ausgerichtete Senderantennen strahlen in horizontaler Richtung mit der maximalen Leistung ab. Auch vertikal ausgerichtete Empfängerantennen können in horizontaler Richtung ein maximales Signal empfangen. Deshalb sind vertikale Antennenstellungen für den Automodellbau optimal. Bei einem leicht erhöhten Standort des Piloten kann die Senderantenne auch ganz leicht nach vorne geneigt sein.



Abb.7 Abstrahlung und Empfang bei optimalen Antennenausrichtungen

Stellt man sich vor, dass der Sender ein Lichtpunkt ist, dann hat dieser Lichtpunkt so eine optimale Projektion auf die gesamte Länge der Empfangsantenne. Diese Darstellung ist zwar etwas vereinfacht, sie gibt die wahren Verhältnisse jedoch ziemlich gut wieder.



Abb.8 Optimale Antennenausrichtungen von Sender und Empfänger

Wenn jetzt die Empfängerantenne gegenüber der Senderantenne etwas verdreht wird, dann wird die Projektionsfläche kleiner, auch das Empfangssignal wird so etwas schwächer. Wenn die Empfängerantenne nicht in diese Richtung, sondern bildlich gesprochen ins Blatt hinein

beziehungsweise aus dem Blatt heraus gedreht würde, würde das Empfangssignal wegen der dann unterschiedlichen Polarisierung ebenfalls abgeschwächt.



Abb.9 Etwas verdrehte Empfangsantenne

Ganz schlecht wird das Empfangssignal, wenn die Sender- und Empfangsantenne senkrecht zueinander ausgerichtet sind. Es ist dabei gleichgültig, ob die Senderantenne in Richtung des Empfängers zeigt oder umgekehrt. In diesem Falle ist gar keine Projektionsfläche vorhanden und deshalb gibt es eigentlich auch kein Empfangssignal. Hier zeigen sich jedoch schon die Grenzen dieser vereinfachten Darstellung. Bei dieser Antennenstellung ist nämlich in der Praxis trotzdem ein Empfangssignal vorhanden. Die Senderantenne strahlt ja eben nicht nur in die eingezeichnete Richtung ab, sondern auch etwas schwächer in die anderen Richtungen. So gibt es hier auch elektromagnetische Wellen, welche auf dem Boden auftreffen, von diesem reflektiert werden und so trotzdem beim Empfänger eintreffen. In Trotzdem sollte man es zu vermeiden versuchen, dass die Antennen aufeinander senkrecht stehen.



Abb.10 Sender- und Empfängerantenne stehen zueinander senkrecht

Alle diese Erkenntnisse können folgendermassen zusammengefasst werden:

*Zwischen dem Piloten und dem Modell sollte wenn möglich Sichtkontakt bestehen, da Hindernisse einen Funkschatten bewirken.*

*Ein erhöhter Standort des Piloten ist für den guten Empfang hilfreich, damit die Fresnel-Zone möglichst frei ist.*

*Wegen der schlechten Materialdurchdringung sollten die Empfängerantennen möglichst ausserhalb des Modells montiert werden.*

*Eine Sender- Stabantenne sollte in einem Automodell möglichst vertikal ausgerichtet sein. Dasselbe gilt für die Empfängerantenne. Es muss vermieden werden, dass eine der beiden Antennen auf die andere zeigt.*



Abb.11 Senkrecht montierte Empfängerantenne in der Praxis



# Volle Peilung



Im letzten Jahrzehnt hat bei den Fernsteuerungen eine Revolution stattgefunden. Die zuvor über fast ein halbes Jahrhundert dominierende MHz-Technologie wurde von der GHz-Technologie abgelöst. Frequenzabsprachen gehören damit der Vergangenheit an, da jede Fernsteuerung mit einer eigenen Sequenz aus unterschiedlichen aufeinanderfolgenden Frequenzen mit ihrem Empfänger kommuniziert. GHz-Wellen weisen aber auch physikalisch andere Eigenschaften als MHz-Wellen auf. Deshalb gibt es auch Unterschiede bei den Sende- und Empfangseigenschaften dieser Fernsteuerungen. Der folgende Artikel soll erläutern, worauf der Fahrer in der Praxis achten muss, um mit 2,4-GHz-Fernsteuerungen einen guten Empfang zu erreichen. Dabei ist die Wahl des richtigen Standorts genauso wichtig wie die Montage und Ausrichtung der Antennen.

dem Blatt heraus gedreht würde, würde das Empfangssignal wegen der dann unterschiedlichen Polarisation ebenfalls abgeschwächt. Ganz schlecht wird das Empfangssignal, wenn die Sende- und Empfangsantenne senkrecht zueinander ausgerichtet sind. Es ist dabei gleichgültig, ob die Sendeantenne in Richtung des Empfängers zeigt oder umgekehrt. In diesem Falle ist gar keine Projektionsfläche vorhanden und deshalb gibt es eigentlich auch kein Empfangssignal. Hier zeigen sich jedoch die Grenzen der vereinfachten Darstellung. Bei dieser Antennenstellung ist nämlich in der Praxis trotzdem ein Empfangssignal vorhanden. Die Sendeantenne strahlt je nach nicht nur in die eingezeichnete Richtung ab, sondern auch etwas schwächer in die anderen Richtungen. So gibt es hier auch elektromagnetische Wellen, welche auf dem Boden aufliegen, von diesem reflektiert werden und so trotzdem beim Empfänger eintreffen. Gleichwohl sollte man es zu vermeiden versuchen, dass die Antennen aufeinander senkrecht stehen. Alle diese Erkenntnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden:



Zwischen dem Piloten und dem Modell sollte wenn möglich Sichtkontakt bestehen, da Hindernisse einen Funkkontakt verhindern. Ein erhöhter Standort des Piloten ist für den guten Empfang hilfreich, damit die Fresnel Zone möglichst frei ist. Wegen der schlechten Materialdurchdringung sollten die Empfängerantennen möglichst außerhalb des Modells montiert werden. Die Sendeantenne sollte möglichst vertikal ausgerichtet sein. Dasselbe gilt für die Empfängerantenne. Es muss vermieden werden, dass eine der beiden Antennen auf die andere zeigt.



Senkrecht montierte Empfängerantenne in der Praxis



**Buchtipps**  
Unter Autor Roland Büchi, ist Modellbauer und Professor für Elektronik und Regelungstechnik an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. In seinem Buch 2,4-GHz-Fernsteuerungen, Grundlagen und Praxis erklärt er, wie die 2,4-GHz-Technologie funktioniert und was unternommen werden kann, um den Empfang im praktischen Modellbau zu verbessern. Als Beispiele werden Antennenanordnungen und Einbauvarianten diskutiert. Das neu erschienene Buch (ISBN Nr. 310 2234) ist ab sofort für 12,80 € erhältlich beim Verlag für Technik und Handwerk neue Medien GmbH, Robert-Bosch-Str. 2, 78532 Duden-Baden, Tel.: 07221/5087-22, E-Mail: service@vth.de

# Sicherer Empfang mit 2,4-GHz-Fernsteuerungen

**Reichweite und Signalschwund**  
Fernsteuerungen senden elektromagnetische Wellen aus, die sich bildlich ähnlich ausbreiten, wie wenn man einen Stein ins Wasser wirft. Dort bilden sich an der Oberfläche kreisförmige Wasserwellen aus, welche sich von Zentrum weg bewegen und dabei immer schwächer werden. Ab einem gewissen Abstand kann man die Welle nicht mehr mit bloßem Auge erkennen. Bei den elektromagnetischen Wellen verhält es sich ähnlich, nur breiten sich die Wellen im ganzen Raum aus. Der Abstand zum Sender, bis zu welchem der Empfänger die Welle als Signal erkennen kann, wird Reichweite genannt. Diese wird bei den meisten gängigen Fernsteuerungen mit mindestens einem bis zwei Kilometer angegeben. Das ist für die Anforderungen im Modellbau mehr als ausreichend. Die Reichweite ist jedoch eigentlich nur von theoretischem Interesse - und deshalb für sich alleine zu wenig aussagekräftig. In der Praxis noch andere Faktoren den sicheren Empfang beeinflussen. Viel wichtiger ist es deshalb, dass der Empfang innerhalb des praktischen Abstands zwischen dem Sender bzw. Fahrer und dem Empfänger bzw. Modell überall und vor allem zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist, auch unter der Berücksichtigung von Reflexionen am Boden oder bei Hindernissen. Beides ist für den Modellbau sehr wichtig. Automodelle bewegen sich ja immer am Boden. Andererseits gehören auch Hindernisse bzw. eine unebene Bodenbeschaffenheit für Offroad-Modelle zu den Normalbedingungen. Die Fernsteuerung muss aber in jedem dieser Fälle zuverlässig funktionieren. Da der Einfluss von allen diesen Faktoren bei den sich immerzu bewegenden Modellen ständig wechselt, ändert sich auch die Signalarbeit beim Empfänger ständig. Dieser Effekt wird auch Signalschwund genannt. Es muss ja immer ein minimales Empfangssignal vorhanden sein, und unter Berücksichtigung aller Faktoren muss immer

das schlechtest mögliche als Maß angenommen werden.  
**Funkschatten**  
Wie die 2,4-GHz-Funkwellen, ist auch das Licht eine elektromagnetische Welle. Man kann deshalb viele Eigenschaften phänomenologisch mit dem Verhalten von Licht vergleichen. Über das sichtbare Licht und dessen Verhalten hat jeder sehende Mensch im täglichen Leben eine umfangreiche Praxiserfahrung. Beispielsweise weiß jeder, dass es einen Schatten gibt, wenn Licht auf ein Objekt trifft. Bei den 2,4-GHz-Wellen kommt das auch ein Funkschatten oder ein Funkloch. Es stellt sich die Frage, was für ein Vergleich mit den Wellen einer 50-MHz- oder 40-MHz-Fernsteuerung angestellt werden könnte. Es kommt als Vergleich das Verhalten von Wasser in Frage. Es handelt sich dabei selbstverständlich nicht um eine elektromagnetische Welle, aber es ist auch etwas, das der Mensch mit seinen Sinnen erfassen kann. Stellt man sich vor, dass Wasser einen Bach hinunterfließt und dabei auf einem Stein als Hindernis trifft, dann umschließt es diese Lücke sofort unterhalb dieses Steins. Der Unterschied in den Vergleichen kommt durch die unterschiedliche Wellenlänge zustande. Diese berechnet sich bei 2,4 GHz wie folgt: Wellenlänge  $\lambda = 300'000'000 / 2'400'000'000 \text{ m} = 0,125 \text{ m}$ , oder 12,5 cm. Bei 35 MHz:  $\lambda = 300'000'000 / 350'000'000 \text{ m} = 0,857 \text{ m}$ . Da die Lichtwellen noch viel kürzer sind als GHz-Wellen, kann man deshalb so argumentieren, dass sich 2,4-GHz-Wellen eher ähnlich dem Licht verhalten, dagegen die MHz-Wellen eher ähnlich dem Wasser. Was das in der Praxis für den Modellbauer heißt, zeigen die Abbildungen 1 und 2. Die Abbildung, welche die 2,4-GHz-Wellen beschreibt, wirft einen relativ langen Funkschatten; eben ähnlich wie derjenige, der entsteht, wenn

Licht auf das Hindernis trifft. Das kann in der Praxis beispielsweise eine Person sein, welche unmittelbar vor der Sendeantenne steht. Die andere Darstellung zeigt das Verhalten der MHz-Wellen. Wasser würde die Lücke hinter dem Hindernis sofort wieder schließen. Die MHz-Wellen tun dies zwar nicht ganz unmittelbar, jedoch ist der Funkschatten deutlich kleiner als bei 2,4-GHz-Wellen. Das führt vor allem für die 2,4-GHz-Fernsteuerungen auf eine Faustregel:  
**Bezieht sich ein Modell und dessen Antenne Sichtkontakt, so ist der sichere Empfang in der angegebenen Reichweite grundsätzlich gewährleistet, die die GHz- und die Licht-Wellen einander ähnlich sind. Versucht ist immer bei Hindernissen zwischen dem Sender bzw. dem Fahrer und dem Empfänger bzw. dem Modell gehen. Ähnlich wie der Pilot das Modell hinter das Hindernis nicht sehen kann, kann auch der Empfänger die Signale nur schlecht „sehen“. Es entsteht ein Funkschatten.**

**Materialdurchdringung**  
Der Vergleich der 2,4-GHz-Wellen mit Licht hat speziell bei der Durchdringung von festen Materialien einige Einschränkungen. Modelle mit geschlossenen Chassis lassen ja überhaupt kein Licht durch. In deren Inneren ist es deshalb immer dunkel. Sehr gut muss man bei CFK-Materialien (kohlenstoffverstärkter Kunststoff) oder Carbon aufpassen. Die Materialdurchdringung der 2,4-GHz-Wellen ist dort sehr schlecht. Die Antenne sollte in diesem Fall immer an der Außenseite des Modells montiert werden. Die Länge der Antenne ist so ausgelegt, dass sie freistehend den besten Empfang gewährleistet. Wenn sie sich in der Nähe von solchen Materialien befindet oder auch wenn sie im Modell in



der Nähe von Kupferleitungen verlegt wird, ist es auch möglich, dass sie elektrisch verstimmt wird. Das hat dann ebenfalls zur Folge, dass die Empfangssignale schwächer werden.  
**Fresnel Zone**  
Hindernisse und sich daraus ergebende Funkschatten sind aber nicht das einzige, was den sicheren Empfang beeinflusst. Zuerst stellt sich die Frage, wie viel „Luft“ oder wie viel „Lauten“ denn überhaupt nötig ist, um ein Signal zuverlässig von einem Punkt zum anderen zu übermitteln. Dies kann mit der Fresnel Zone erklärt werden. Die Fresnel Zone ist eine Ellipse, in deren Brennpunkten sich jeweils die Sende- und Empfängerantenne befinden. Die Fernsteuerung mit vertikal gestellter Sendeantenne strahlt in direkter Richtung zum Modell, also entlang der Linie d (für Distanz) mit der maximalen Feldstärke ab. Es existiert jedoch auch eine etwas schwächere Abstrahlung in Richtung der Linie a. Nimmt man einmal an, dass sich zufällig ein Objekt, wie beispielsweise der Boden, genau am Rand dieser Fresnel Zone befindet, wo die elektromagnetische Welle a auflieft, dann wird sie bei passender Topografie in Richtung des Modells reflektiert. Die Welle, welche die Distanz a+b zurücklegen muss, hat bis zum Modell einen längeren Weg als die Welle, welche nur d zurücklegen muss. In der Fachsprache nennt man diesen Effekt auch „Auslöschung“ oder „Destructive Interferenz“. Grundsätzlich bewirkt jede Welle, welche innerhalb der Fresnel Zone reflektiert wird, dass beim Modell eine größere oder kleinere Abschwächung der direkten Welle ankommt. Somit lässt sich folgender Merksatz herleiten:  
**Wenn die Fresnel Zone frei von Hindernissen ist und auch der Boden nicht in den Weg kommt, dann ist der sichere Empfang innerhalb der angegebenen Reichweite der Fernsteuerung gewährleistet.**



**Erhöhter Standort der Fahrer in der Praxis.**  
Die Höhe h der Fresnel Zone ist vom Abstand zwischen Fernsteuerung und Modell abhängig. Für 2,4-GHz-Fernsteuerungen beträgt sie bei 50 m Abstand 1,25 m und bei 100 m Abstand 1,75 m. Im Idealfall sollte die Empfangsantenne im Modell so weit oben wie möglich montiert werden. In der Praxis ragt aber die Fahrbahn immer mehr oder weniger stark in die Fresnel Zone hinein. Die dargestellten „Seitenansichten“ werden dann beide innerhalb der Fresnel Zone reflektiert und tragen wegen möglichen Größenverhältnissen zur Verschlechterung der Empfangsqualität bei.  
Um das Empfangssignal zu verbessern, muss man immer darauf achten, dass der Boden möglichst weit in die Zone hineinragt. Dazu hilft einerseits ein erhöhter Standort des Fahrers oder oben die erhöhte Antennenmontage beim Empfänger. Ein erhöhter Standort verbessert also nicht nur die Sicht, sondern sie ist auch im Hinblick auf eine möglichst freie Fresnel Zone von Vorteil.

**Antennenanrichtung**  
Senkrecht ausgerichtete Sendeantennen strahlen in horizontaler Richtung mit der maximalen Leistung ab. Auch vertikal ausgerichtete Empfängerantennen können in horizontaler Richtung ein maximales Signal empfangen. Deshalb sind vertikale Antennenanordnungen für den Automodellbau optimal. Bei einem erhöhten Standort des Piloten kann die Sendeantenne auch ganz leicht nach vorne geneigt sein. Stellt man sich vor, dass der Sender ein Lichtpunkt ist, dann hat dieser Lichtpunkt so eine optimale Projektion auf die gesamte Länge der Empfangsantenne. Die Darstellung ist zwar etwas vereinfacht, sie gibt die wahre Verhältnisse jedoch ziemlich gut wieder. Wenn jetzt die Empfängerantenne gegenüber der Sendeantenne etwas verdreht wird, dann wird die Projektionsfläche kleiner, auch das Empfangssignal wird so etwas schwächer. Wenn die Empfängerantenne nicht in diese Richtung, sondern bloß gesprochen ins Blatt hinein bzw. aus

### Buchtip

Unser Autor, Roland Büchi, ist Modellbauer und Professor für Elektronik und Regelungstechnik an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. In seinem Buch „2,4-GHz-Fernsteuerungen“ erklärt er, wie die 2,4 GHz- Technologie funktioniert und was alles unternommen werden kann, um den Empfang im praktischen Modellbau zu verbessern. Als praktische Beispiele werden Antennenstellungen und Einbauvarianten diskutiert.

### Literatur

- [1] Büchi, Roland. "2, 4-GHz-Fernsteuerungen: Grundlagen und Praxis." (2013). Verlag für Technik und Handwerk neue Medien GmbH  
ISBN: 978-3-88180-449-3
- [2] Büchi, Roland. *Radio control with 2.4 GHz*. BoD–Books on Demand, 2014.  
ISBN: 978-3732293407