

Alles zu 2,4 GHz

Inhaltsverzeichnis

2.4GHz für Modellbauer erklärt	3
Systemübersicht 2,4GHz	3
Kompatibilität.....	4
Signalübertragungsverfahren.....	4
Problem der „Funklöcher“	5
Empfängerprobleme	6
Belastung der Stromversorgung.....	6
Fazit	6
Nachtrag März 2011	7
Alles zu 2,4 GHz	8
Die Ausgangssituation	8
Erläuterungen der Begriffe.....	8
Zulassungspflicht	10
Weitere Begriffe	10
2.4 GHz Fernsteuerungen und deren Funktionsweise	12
Reichweite und Sicherheit bei 2,4GHz-Technik	16
Die neue Fernsteuerfrequenz 2.4 GHz in Europa Rechtliches	20
Verschlüsselungsmethoden:	20
Funksicherheit auf 2.4GHz:	21
Rechtlicher europ. Stand der Dinge bezüglich Verwendung von DSSS mit mehr als 10mW noch immer nicht (26.10.2009) geklärt.	22
Frequenzbänder im RC Modellbau RC Modellbau Blog	25
Spread-Spectrum, das unbekannte Wesen	26
Grundlagen.....	26
Kanalkapazität	26
Kanalerschöpfung.....	27
Bandbreitenüberschuss.....	27
Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)	28
Hybride Systeme	31
Die Kehrseite der Medaille	33
Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)	35
Bandbreite und Störanfälligkeit	35

Slow Hopping.....	35
Fast Hopping.....	36
Bekannte 2,4 GHz Systeme, die FHSS nutzen	36
Reichweite einer 2,4 GHz Fernsteuerung	37
Die theoretische Reichweite bei 2,4 GHz Anlagen.....	37
Die praktische Reichweite bei 2,4 GHz Steuerungen	37
Reichweite von 2,4 GHz Systemen steigern.....	37
Mehr praktische Reichweite durch mehrere Empfänger im Parallelbetrieb.....	38
Auslegung und Ausrichtung der Antennen	38
Wie viel Reichweite benötigt man für ein Modellflugzeug?	38
Reichweitentest 2,4 GHz (nicht wissenschaftlich).....	39
Kollisionswahrscheinlichkeit bei 2,4 GHz R/C-Systemen	40
Diversity-Technik Stör/Rauschabstand	46

2.4GHz für Modellbauer erklärt

aus <http://www.flugwiese.de/index.php/elektronik/fernsteuerungen/104-wissen24>

Dieser Artikel ist eine Sammlung mit Wissenswertem zum Thema Fernsteuern mit 2,4GHz - Alles was sie schon immer mal fragen wollten.



Der Markt der 2,4GHz-Systeme ist in ständiger Bewegung. Neue Systeme sind angekündigt und der intensive Wettbewerb zwischen den verschiedenen Anbietern sorgt für zahlreiche Neuerungen.

Systemübersicht 2,4GHz

Folgende Systeme der verschiedenen Hersteller sind derzeit (Stand 20-10-2010) in Deutschland erhältlich;

- Spektrum - DSSS (Das erste kommerzielle 2,4 GHz Fernsteuersystem)
- JETI 2,4 - DSSS/FHSS-Hybride (Erste europäische Entwicklung)
- Futaba FASST - FHSS (Japanisches Qualitätssystem - erstes FHSS am Markt)
- Multiplex MLINK - FHSS (Deutsche Entwicklung)
- ACT S3D - FHSS (Deutsche Entwicklung)
- Graupner IFS - IFS auf Basis XBEE (Identisch mit dem amerikanischen XPS System - wird wohl Ende 2010 durch ein neues System bei Graupner abgelöst)
- Graupner Weatronic - FHSS (Deutsche Entwicklung)
- HITEC - FHSS (Koreanisches System - leider nicht mit Multiplex kompatibel!)
- FrSky - FHSS (höherwertiges China-System)
- Assan - DSSS (sehr billiges China-System)
- Schulze S3D - FHSS (kompatibel mit ACT S3D)
- Graupner HOTT- FHSS (System aus Korea???)

Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. (Stand 20-10-2010)

Kompatibilität

Die derzeit am Markt befindlichen 2,4GHz Systeme sind NICHT untereinander kompatibel, da Sie zwar das gleiche Frequenzband aber verschiedene Sendeprotokolle benutzen. Mit dem Kauf des Senders bzw. des Sendemoduls legt man sich also fest, welches Sendeprotokoll man benutzt und damit auch welche Marke der Empfänger man künftig kaufen muß! Wer also z.B. Multiplex MLINK fliegt, muß auch Multiplex Empfängern benutzen.

Allerdings sind findige Entwickler dabei, "kompatible" Fremdempfänger zu entwickeln und anzubieten. Für Spectrum DSSS gibt es einige "kompatible" Empfänger aus Fernost - teilweise zum 1/3 des Preises der Originale. Über die Qualität kann ich leider nichts sagen, würde aber bei einem teureren Voll-GfK Modell lieber auf erprobtes Material vom Originalhersteller zurückgreifen.

Auch für Futaba FASST - in Deutschland im Vertrieb von Robbe - gibt es mittlerweile kompatible Empfänger. Diese kommen zum einen aus China, auch auch die Fa. SIMPROP hat seit September 2010 FASST-kompatible Empfänger im Angebot. . Auch hier kann ich keine Aussage zur Qualität machen, da ich die Systeme nicht besitze.

Signalübertragungsverfahren

Bei den 2,4GHz Fernsteuerungen gibt es zwei verschiedene Funkverfahren zur Signalübertragung: DSSS und FHSS.

Das DSSS Verfahren

Diese Methode war das erste für Fernsteuerungen im Modellbau eingesetzte Verfahren. Die Vorteile bei DSSS sind der Störungsschutz, welcher durch die Technik der Funkstrecke erreicht wird. Daher braucht es kein spezielles Übertragungsprotokoll und die Anforderungen an die Technik sinken. Daher sind diese Empfänger in der Regel sehr günstig zu produzieren, da es bereits Low-Cost-Schaltkreise gibt, die diese Funktionalität "integriert" haben.

Allerdings hat DSSS auch einige Nachteile. Bei dieser Technik steigt der Hardwareaufwand rasch sehr stark, wenn dieser Störungsschutz ein hohes Niveau haben soll. Die nötige Schaltungstechnik wird sehr aufwändig und damit teuer. Es ist zwar theoretisch ein recht hoher Schutz vor Störungen machbar, aber die Zeiten, welche erforderlich sind um Sender und Empfänger zu synchronisieren, werden dann extrem lang. Das hat zur Folge, dass nach einer unterbrochenen Verbindung bis zu 10 Sekunden vergehen können, bis der Empfänger wieder auf die Befehle des Senders reagieren kann. Für Flugmodelle ist das definitiv zu lang. Es gibt zwar Verfahren zur schnellen Synchronisation, aber diese Verfahren versagen in der Regel beim Aufeinandertreffen von „starkem Störer“ mit „sehr schwachem Nutzsignal“ ziemlich kläglich. (Teilweise wird hier versucht mit Hardware die Empfindlichkeit des Empfängers zu erhöhen - z.B. durch Satellitenempfänger – aber die erreichten Verbesserungen bleiben unbefriedigend)

Die aktuellen DSSS Systeme belegen beim Einschalten zwei breite Signalbereiche und springen dann zwischen diesen beiden Sendebereichen hin- und her. Nachfolgend ein Bild:



Das FHSS Verfahren

Die Alternative ist die FHSS Technik. Sie kommt mit der Situation „starker Störer/schwaches Nutzsignal“ sehr gut zurecht. Auch sind bei guter Schaltungstechnik die Synchronisationszeiten nach einem Verbindungsausfall sehr kurz - teilweise im Bereich von wenigen Millisekunden. Es sind dabei keine komplexen Schaltungen nötig, die erforderliche Hardware ist im Vergleich zu DSSS recht einfach. Aber auch FHSS hat (allerdings eher theoretische) Nachteile: Um einen tauglichen Störungsschutz zu erhalten, ist ein übergeordnetes Übertragungsprotokoll erforderlich. Dies hat zur Folge, dass eine Störung immer die tatsächliche Übertragungsgeschwindigkeit verringert. Allerdings kann mit moderner Schaltungstechnik eine so hohe Übertragungsrate der Steuerungssignale erreicht werden, dass ein Signalverlust für die im Modellbau relevanten Übertragungsgeschwindigkeiten keine spürbaren Verzögerungen verursacht.

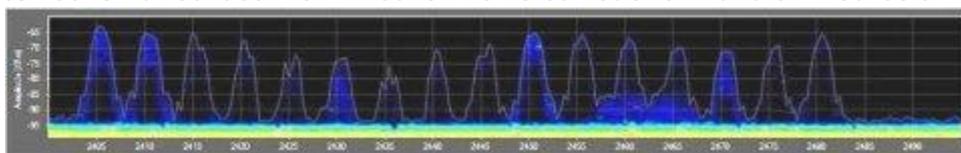
Ein FHSS System nutzt den ganzen Frequenzbereich aus und springt permanent zwischen den verschiedenen Kanälen



Die Unterschiede zwischen den verschiedenen FHSS Systemem liegt in der Anzahl der Kanäle die benutzt werden - zwischen 32 und 80 Känalen. Je mehr Kanäle, desto besser (zumindest in der Theorie)

DSSS/FHSS Hybride

Einige Systeme am Markt sind sogenannte DSSS/FHSS-Hybride. Dabei wird versucht, die Vorteile beider Technologien zu kombinieren. Das bekannteste Hybride System ist das JETI System. Hier wird der Frequenzbereich mit einem DSSS Signal belegt, der aber nach einem festen Schema recht schnell zwischen 16 verschiedenen Kanälen wechselt.



Man erkennt ein "breites" DSSS Signal das zudem zwischen 16 Kanälen wechselt.

Problem der „Funklöcher“

Fast jeder Modellflieger hat schon Erfahrungen mit sogenannten „Funklöchern“ sammeln können. Damit ist das Phänomen bezeichnet, dass es auf fast jedem Modellfluggelände einzelne Bereiche gibt, an denen es regelmäßig zu Funkstörungen kommt.

Dieser Effekt entsteht durch Signalreflektionen des Funksignals bei denen es zu einer Auslöschung oder Überlagerung des Sendersignals am Empfangsort kommt. Die Lage dieser „Funklöcher“ ist aber frequenzabhängig, d.h. nach einem Wechsel der Sendefrequenz ändert sich auch die räumliche Lage des „Funklochs“. Damit sind FHSS Systeme die kontinuierlich die Frequenz wechseln erheblich störfester und vom Phänomen des „Funklochs“ spürbar geringer betroffen als DSSS System die in der Regel nur auf zwei festen Frequenzen senden.

Empfängerprobleme

Auch bei 2,4GHz Systemen sind die Hauptursache für viel angebliche "Empfangsstörungen" Probleme mit der Empfängerstromversorgung. Insbesondere bei Systemen mit Telemetriesensoren und Digitalservos steigen die Ansprüche an die Qualität des Empfängerakkus, da die Stromaufnahme des Empfängers steigt. Dies ist zum einen durch die Rückstrecke bedingt (der Empfänger sendet ja auch zurück) zum anderen durch die teilweise gleichzeitige Ansteuerung der Servos. Werden dann noch moderne Digitalservos benutzt kann sich der Strombedarf spürbar steigern. Die Folge: Der Empfängerakkku hat eine deutlich kürzere Betriebsdauer - oder - wenn der Akku bzw. das BEC des Reglers überlastet wird, bricht unter Belastung die Spannung zusammen. In der Folge bekommt der Empfänger einen RESET und muss sich dann erst wieder mit dem Sender synchronisieren. Das kann je nach Fabrikat und Funktechnik zwischen 0,1 bis 5 Sekunden dauern. Die Folgen bei längeren Zeiten kann sich jeder selbst ausmalen - meistens ein Absturz!

Belastung der Stromversorgung

Wenn viele große Servos an den Empfänger angeschlossen sind und diese zeitgleich angesteuert werden, dann fällt der recht hohe Anlaufstrom aller angeschlossenen Servos ebenfalls zeitgleich an. Dies können bei 6 Servos durchaus Ströme in einer Größenordnung von 12-15A sein. Das führt zu einer enorm hohen Belastung des Empfängerakkus (bzw. des BEC) mit der Folge, dass dessen Spannung kurzzeitig einbrechen kann. Dieser Spannungseinbruch wird umso stärker sein, je höher der Innenwiderstand des Empfängerakkus ist. Daher ist es sehr wichtig, beim Empfängerakku Zellen mit einem geringen Innenwiderstand zu verwenden.

Die Kapazität des Akkus - also dessen Größe - spielt hier eine untergeordnete Rolle.

Die derzeit in Deutschland erhältlichen 2,4 GHz Anlagen verhalten sich wie dabei folgt:

- Weatronic zeitgleich oder versetzt (ist einstellbar)
- Graupner IFS annähernd zeitgleich
- Fasst teilweise zeitgleich (4 Kanäle)
- ACT teilweise zeitgleich (4 Kanäle)
- Jeti versetzt wie PPM
- Spektrum versetzt wie PPM
- MPX teilweise (je 2 Kanäle) zeitgleich
- Sanwa RDS-8000 versetzt wie PPM
- Sanwa SD-10G teilweise (2 Kanäle) zeitgleich.

Wenn Sie also Ihr Segelflugmodell auf 2,4GHz umrüsten, dann gönnen Sie dem Flieger bitte auch einen neuen Empfängerakku! Und bei Motorflieger bitte einen modernen Regler mit einem leistungsfähigen BEC System benutzen.

Fazit

Reine DSSS Systeme sind also nicht so ganz das Gelbe vom Ei wenn man Flugmodelle damit im 2,4GHz Bereich steuern will. Die Probleme der langen Synchronisationszeiten nach einer Störung sind in der Regel für das Modell tödlich. Auch das Problem der festen Sendefrequenzen nach dem Einschalten kann zu obskuren Empfangsproblemen führen, die nur sehr

schwer nachvollziehbar sind, denn bei nächsten Mal werden ja "andere" Kanäle belegt. Da die Hersteller aufgrund gesetzlicher Bestimmungen gezwungen sind, mit recht geringen Signalstärken zu arbeiten, ist wegen des besseren Verhaltens bei „starker Störer/schwaches Nutzsignal“, wegen der schnellen Synchronisation im Falle einer Verbindungsunterbrechung und der vollständigen Ausnutzung aller Sendekanäle durch regelmäßigen Frequenzwechsel für den Flugmodellbau auf jeden Fall ein FHSS-System oder ein DSSS/FHSS-Hybridsystem zu bevorzugen.

Vom Kauf und Einsatz von reinen DSSS Systemen – also z.B. SPEKTRUM oder ASSAN – im Flugmodellbau rate ich daher dringend ab.

Nur die Systeme von SPEKTRUM, Corona, Assan, und WFly sowie diverse "Billig-Spielzeug-Helikopter" benutzen noch ein DSSS Verfahren. Die Gründe dürften in der deutlich billigeren Technik liegen, mit der sich niedrigere Preise bzw. deutlich höhere Gewinnspannen realisieren lassen. Ich gehe aber davon aus, dass mittelfristig alle DSSS Systeme aus dem Flugmodellbau verschwinden werden.

Nachtrag März 2011

Auch die Firma Spektrum hat die Zeichen der Zeit erkannt und hat mit viel Marketing-Getöse ein neues Modulationsverfahren eingeführt. Man nennt es DSMX und wurde mit dem neuen Sender DX8 eingeführt. Damit sendet dieser Sender auch FHSS, allerdings nur in Verbindung mit den entsprechenden neuen Empfängern wie z.B. AR8000. Bei den alten Empfängern und den billigen CHINA-Empfängern (z.B. von HobbyKing) geht auch weiterhin nur DSSS und diese Empfänger sind damit extrem unsicher!

Es bleibt spannend. Wenn es etwas gibt das hier noch fehlt, schreiben Sie bitte einen Kommentar. Die Informationen werden dann bei passender Gelegenheit ergänzt.

Alles zu 2,4 GHz

aus <http://www.acteuropa.de/html/alles_zu_2_4ghz.html>

Neue Technik, neue Begriffe, neue Unsicherheiten.

Hier wollen wir Ihnen die wichtigsten neue Begriffe im 2,4GHZ Bereich erläutern.

Die Ausgangssituation

stellt sich vielleicht für viele Anwender verworren dar, lässt sich aber einfach aufklären.

Das 2,4 GHz Band stellt 80 Kanäle mit 1MHz Bandbreite zur Verfügung (eigentlich 83,5). Nutzer des 2,4GHz-Frequenzbandes müssen bestimmte technische Normen einhalten. Im Moment gelten zwei Normen: Die bisherige Norm 300 328 1.6.1, diese wird bindend abgelöst im July 2008 durch die Norm 300 328 1.7.1. Diese Normen stellt in Europa im Prinzip der Europarat zusammen, die Ausführungsbestimmungen werden in der ETSI veröffentlicht.

Die Normen für 2,4 GHz schreiben im Grunde für alle Geräte/Nutzer eine technische Lösung vor, die verhindert, dass diese Geräte sich gegenseitig stören können. Daraus ergibt sich die selbstständige Frequenzwahl der Geräte beim Einschaltprozess oder im Betrieb, es muss sichergestellt werden, dass keine gegenseitige Störungen entstehen können.

In den Normen werden noch ein paar zusätzliche Randbedingungen beschrieben wie die maximale Leistung usw. Ganz generell gibt es keine Einschränkung für Anwendungen von 2,4GHz Geräten (auch wenn da andere Gerüchte im Umlauf sind).

Diese selbstständige Frequenzwahl wird von Modellpiloten als größter Vorteil zur bisherigen Technik empfunden und als Kaufargument angegeben.

Alle Geräte, welche technisch die Normen einhalten, dürfen betrieben werden, ob Wlan, Blue tooth usw., und daher eben auch Fernsteuerungen.

Das Problem für Fernsteuerbetrieb ist einfach die sichere, unterbrechungsfreie Reichweite bei kleinen, erlaubten Abstrahl-Leistungen. Für andere Geräte im 2,4GHz-Band spielen kurze Unterbrechungen keine große Rolle, für Fernsteuerungen schon.

Für eine Modellfernsteuerung benötigen wir eine sichere (unterbrechungsfreie) Funkverbindung für mindestens 1500m, auch unter schwierigsten Bedingungen. Für 2,4 GHz gibt es da keinen Unterschied zu 35MHz.

Da ist lösbar, bedarf aber eines bestimmten Aufwandes.

Erläuterungen der Begriffe

Kompatibilität

Kein System ist untereinander kompatibel !!!

Bedeutet für den Kunden, dass ein bestimmter Sender nur die dazu gehörigen Empfänger vom gleichen Hersteller ansteuern kann. Die Auswirkungen sind bekannt, denken Sie nur an die Situation mit PCM bei 35MHZ-Technik..... Kunden müssen sich also für ein bestimmtes "Lager" entscheiden. Das wird interessant, wenn man weiß, wieviele Angebote es noch von unseren fernöstlichen "Freunden" geben wird.....

Spread Spektrum (Bandspreizmodulation)

Die Übertragungs-Technologie, die im 2,4 GHz Band standardmäßig angewendet wird. Dazu zählen verschiedenartige Spread Spectrum Modulationen wie Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) und Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). Diese Modulationen sind die Grundlage von Codemultiplexverfahren und weiten das Sendespektrum im Vergleich zum Nutzdatenspektrum extrem auf. Der Empfang mittels Korrelation ist durch spezielle Codefolgen gekennzeichnet, die meistens zufallsähnliche Eigenschaften besitzen, und welche die einzelnen Kanäle voneinander unterscheiden. Damit sind auch Übertragungen möglich, wo deren Sendesignal unterhalb des Hintergrundrauschpegels liegt und damit nicht einmal die Existenz einer Übertragung erkannt werden kann. Bei Bedarf kann die Nachrichtenübertragung wie bei allen anderen Modulationen auch verschlüsselt erfolgen. Eine Detektion ob eine Übertragung erfolgt, ist nur bei Kenntnis der entsprechenden Bandspreiz-Codefolgen und mittels Korrelation möglich.

Abstrahl-Leistung

Nach ETSI-Norm 2008, und die ist unumstößlich in Europa einzuhalten ab July 2008, darf die maximal abgestrahlte Leistung 100mW betragen (EIRP = Strahlungsleistung). Das ist verkürzt die maximal abgestrahlte Leistung (Peak) zu jedem Zeitpunkt. Damit ist klar, dass hier keine durchschnittliche (average) Leistung von 100mW erlaubt ist wie in den USA.

10mW

ist die Abstrahl-Leistung, die in Europa ohne Einhaltung der Normen erlaubt ist.

10mW/Mhz spektrale Leistungsdichte

Die Begrenzung der spektralen Leistungsdichte macht keine direkte Aussage über die Sendeleistung. Das Limit liegt bei 10 mW/MHz. Mit 10 MHz Bandbreite (bei passendem Spektrum) hat man auch wieder 100 mW. WLAN darf auch nur 10 mW/MHz, hat aber trotzdem 100 mW Ausgangsleistung.

Verdeutlichung:

10 mW/ MHz bedeutet, dass in einem 1 MHz breiten Segment des Senderspektrums 10 mW Leistung enthalten sein dürfen. Man kann davon aber viele Segmente nebeneinanderstellen und bekommt entsprechend mehr Leistung.

Beispiel:

Wir nehmen eine normale Tüte Milch (das ist das eine MHz). Da ist ein Liter drin (das ist die spektrale Leistungsdichte). Wenn wir jetzt 10 Tüten nebeneinander stellen, haben wir 10 Liter Milch zu trinken. Das Limit der Norm ist also 10x1L-Tüten Milch. Man kann die nun auch anders verteilen und man nimmt kleine Tüten mit 0.5 Liter. Dann sind das eben 20 Tüten. Die Summe ist aber immer gleich. Je kleiner die Tüte (spektrale Leistungsdichte), um so mehr Tüten dürfen wir nehmen. (Quelle: Frank Tofahrn).

USA

Bei Geräten aus den USA werden oft 100mW Leistung angegeben, genauer geht man nicht darauf ein. Manchmal steht dabei, dass diese Spezifikation nur in den USA zulässig ist. Dabei ist aber gemeint, 100mW durchschnittliche Leistung. 1W für 1/10 sek ist dann z.B. 100mW durchschnittliche Abstrahlleistung.

Verschachtelt und variiert man das auch noch, kann man mit bis zu 1 Watt senden, und hat trotzdem nur 100mW Peak-Leistung. Damit kann man natürlich auch unter schwierigen Bedingungen eine ausreichende Verbindung über die notwendigen Entfernungen schaffen.

Nur , das alles gilt für die USA, ist aber in Europa nicht erlaubt. Daher ist der Vergleich von Reichweiten-Ergebnissen von 100mW Geräten aus den USA mit den Ergebnissen von 100mW Geräten aus Europa einfach Humbug.

Diejenigen, die hier lässig mit "100mW Leistung" und Wahnsinns-Reichweiten um sich werfen , sollten einfach gefragt werden, ob die Reichweite mit 100mW Abstrahlleistung EIRP (Europa, peak) oder durchschnittlich (USA zeitweise erheblich mehr, average) erzielt wurde.

Wie auch immer, wer hier in Europa mit zu viel Leistung arbeitet, geht das Risiko des ersatzlosen Einzugs der Fernsteuerung. Vereine sollten sich absichern auf Veranstaltungen, denn mit Sicherheit wird die Bundesnetzagentur gerade da Kontrollen durchführen. Da für die Einhaltung der Normen im Prinzip der "Wettbewerb" der einzelnen Hersteller sorgt, werden diese auch dafür sorgen, dass nicht mit unzulässigen Mitteln gearbeitet wird. Da hilft auch kein Hinweis auf Bestandsschutz, denn auch nach der jetzigen (1.6.1) noch gültigen Norm sind bestimmte USA Geräte nicht zulässig.

Also schnell noch ein USA-Gerät kaufen um Bestandsschutz zu erreichen funktioniert nicht. Geräte mit Bestandsschutz sind nur die, die der Norm bis July 2008 entsprechen.

Bi-direktional

Eine Übertragungs- Methode, bei der Sender und Empfänger gleichberechtigt sind und immer voneinander "wissen. Es gibt zwei(bi) Funkstrecken(direktional), eine vom Sender zum Empfänger und eine vom Empfänger zum Sender. Dadurch "wissen" Sender und Empfänger immer über die Empfangsverhältnisse im Modell "Bescheid", das System kann notfalls bei Störungen auf eine ungestörte Frequenz wechseln. Diese Methode ist mit 100mW Peak-Leistung erlaubt. Damit kann die grundsätzlich vorgeschriebene Betriebsart eingehalten werden: Geräte auf 2,4 GHz dürfen sich nicht gegenseitig stören.

Durch die Datenübertragung vom Modell zum Sender können natürlich weitere Daten, z.B. von Sensoren, nach unten übertragen werden. Ein weites Feld für interessante Anwendungen

Frequenz-Hopping(Continous channel shifting)

Beim Frequenz-Hopping wechseln Sender und Empfänger in einem genau definiertem, sehr kurzen Takt gleichzeitig die Frequenz innerhalb der Kanäle im 2,4Ghz Band. Damit wird kein Frequenzkanal

innerhalb des Bandes für länger als die Takt(shift)zeit (z.B. 2ms=2tausendstel sek) gestört. Frequenzhopping ist ein Methode, welche es ermöglicht, die Normen einzuhalten ohne Rückstrecke (bi-direktional) zu arbeiten. Durch die kurze Einschaltzeit auf einer Frequenz wird diese eines anderen Nutzers eben auch nur kurz gestört. Das lässt die ETSI-Norm zu. Das Ganze ist dann mit 100mW Peak-Leistung erlaubt. Die Möglichkeiten der Datenübertragung vom Modell zum Sender kann auch genutzt werden, wenn das Systemzusätzlich bi-direktional arbeitet.

Zulassungspflicht

Diese gibt es bei 2,4 GHz Fernsteuerungen nicht mehr, es handelt sich um eine allgemeine Norm oder Vorschrift, für deren Einhaltung der "Inverkehrbringer" haftet. Damit wird die Kontrolle der Einhaltung von Normen auf den "Markt abgewälzt". Und der Wettbewerb wird dafür sorgen, viel besser als irgend welche Gesetze oder Vorschriften, dass kein Lieferant Geräte in den Markt bringt, die nicht den Normen entsprechen.

Aber Achtung! Wer Geräte in den USA kauft, auch als Privat-Person, ist Inverkehrbringer, beweispflichtig und haftbar für die Einhaltung der europäischen Normen. Nicht der Hersteller in den USA.

ETSI ist die europäische Normenkommission, die für die Ausarbeitung solcher Vorschriften in Europa zuständig ist.

Zusammenfassung Normen :

Geräte in 2,4GHz Band mit mehr als 10mW Strahlungsleistung dürfen sich gegenseitig nicht stören und müssen die Normen erfüllen. Dies kann entweder durch bi-direktionalen Betrieb oder durch Frequenz-Hopping oder beides gleichzeitig sicher gestellt werden.

Reichweite mit 100mW Peak-Leistung

Wir setzen für eine sichere Fernsteuerung voraus, dass man die Anwendung nicht auf bestimmte Modellgrößen einschränken muß. So wie wir Reichweite definieren (> 1500m) ist das technisch (eigentlich) kein Problem, lässt sich aber aus unserer Sicht nicht mit den üblichen Lösungen aus USA sicher erreichen. Hier müssen spezielle technische Lösungen angewendet werden, welche die technischen Vorgaben (100mW) schon bei der Konstruktion berücksichtigen. USA-Lösungen der 2ten Generation, wie sie derzeit angeboten werden, sind aus unserer Sicht nicht ausreichend.

Unser System wird speziell darauf Rücksicht nehmen, der von ACT eingeführte Begriff „Diversity“ spielt da eine noch viel größere Rolle als im 35MHz Bereich. Wie dort gibt es bei 2,4GHz noch vielmehr physikalisch bedingte Richtwirkungen von Antennen, und das lässt sich nur mit Diversity erfolgreich ausgleichen. Da haben wir als Firma ACT sicher die größte Erfahrung aller Hersteller, denn hier geht es nicht nur um Hardware, da ist vor allem Auswertesoftware gefragt. Und die aktuellsten 2,4GHz Chips.

Weitere Begriffe

Auflösung/Resolution

Hier ist die Genauigkeit der Servoansteuerung am Servoausgang gemeint. Die besten Servos können heute 1000Schritte für Vollausschlag links/rechts auflösen. Ob nun doppelt so viele Schritten (2048) oder die vierfach Auflösung (4094), die Servos können nicht mehr als 1000 Schritte. Wer allerdings Systeme anbietet mit mehr als 65.000 Schritte, sollte erklären können, zu was das sinnvoll ist.....

10bit, 11bit, usw. 15Bit, 16Bit

ist der Hintergrund für die Servoauflösung von 65...tausend Schritte. 8Bit sind 256Schritte, 9bit sind 1024 (Futaba und Graupner PCM), 10bit sind 2048 (Futaba G3PCM),4096, 8192, 16384, 15Bit=32768, 16Bit=65536. Sie haben mitgezählt? Diese Zahl ist nicht anderes als die Prozessorauflösung bzw. Prozessorleistung. Wie sinnvoll die allerdings für die Servoauflösung ist, muß jeder selber entscheiden.

Latenz

(v. lat.: latens = verborgen) bedeutet :unter der Oberfläche, noch nicht in Erscheinung Tretendes. In verschiedenen Zusammenhängen spricht man auch von der Latenzzeit als Zeitraum zwischen einer Aktion und dem Eintreten einer Reaktion, also einer Verzögerungszeit.

Damit ist die Zeitspanne gemeint, die ein Datenpaket in Computernetzwerken von Sender zu Empfänger benötigt. Diese kommt durch die Laufzeit im Übertragungsmedium und durch die Verarbeitungszeit aktiver Komponenten zustande.

2,4 GHz Fernsteuerungen sind immer mehr als schnell genug, schneller als PPM, deutlich schneller als frühere PCM-Systeme in 35MHz. Trotzdem waren diese Fernsteuerungen schon immer schnell genug.

Binding

ist die Methode, mit der Sender und Empfänger aufeinander abgestimmt werden (Gebunden). Die Verfahren sind unterschiedlich, deshalb sind 2,4GHz Systeme auch nicht kompatibel zu einander. Im Prinzip tauschen Sender und Empfänger beim einschalten für kurze Zeit Daten aus und verständigen sich auf einen best. Code für die Datenübertragung. Damit verstehen sich nur dieser Sender und dieser Empfänger. Dies wird oft (nicht unbedingt zurecht) als Grund genannt, dass 2,4GHz Steuerungen nicht mehr störfähig sind.

Echtzeit Datenübertragung/Real Time

Die gibt es, seit wir Fernsteuerungen haben, ob nun zu Zeiten von 27MHz oder 35/40/72 Mhz oder jetzt 2,4 GHz. Jeder Hersteller behauptet (verständlicherweise) seither mehr oder weniger, die Reaktion am Empfänger erfolgt in "Echtzeit". Sieht man es historisch und vergleicht heutige Übertragungszeiten mit denen von früher, dann müßte heute eigentlich das Modell schon in eine bestimmte Richtung fliegen, bevor der Pilot weiß wohin er steuern wird. In der Praxis sind einfach alle Fernsteuerungen schneller als der Pilot steuern kann, da sind "Geschwindigkeitssteigerungen" wenig spürbar (s. Latenz).

Customized IC

Gemeint sind kundenspezifische Schaltkreise, die für einen Elektronik-Hersteller für eine bestimmte Anwendung hergestellt werden. Damit kann man u.U., eine höhere Integrität erreichen, die Bauteile auf der Platine werden weniger. Technische Vorteile entstehen dadurch aber nicht automatisch. Nachteile sind, dass man sehr hohe Stückzahlen produzieren lassen muß, und bei eventuellen Fehlern sitzt man dann auf den Bausteinen. Außerdem können technische Fortschritte nicht so schnell umgesetzt werden, man muß ja erst den Lagerbestand vorhandener "Customized ICs" abbauen. Wir kennen keinen Fernsteuerhersteller, der tatsächlich eigene Schaltkreise einsetzt. Firmeneigene Aufschriften auf Prozessoren gibt es allerdings, das sind aber noch lange keine "customized IC".

2.4 GHz Fernsteuerungen und deren Funktionsweise

Beat Stucki aus <http://www.mgthun.ch/Berichte/2_4GHz.html>



Wie geht das eigentlich, sich nicht mehr um Steckquarze und Frequenzen zu kümmern und dann ist noch alles auf den gleichen Frequenzen wie WLAN und Bluetooth und funktioniert trotzdem?

Wie verschieden sind die Systeme der verschiedenen Hersteller?

Beat Stucki versucht als Elektroingenieur mit diesem Artikel einen Spickzettel für jedermann mit folgenden Zielen zu erstellen:

- Der Leser die verschiedenen Systeme unterscheiden kann
- Der Leser Berichte und Broschüren zu neuen Steuerungen besser beurteilen und einordnen kann
- Der Leser Vergleiche ziehen kann mit der Sprachkommunikation

Im Frequenzband von 2400 MHz bis 2483.5 MHz sind Hochfrequenzanwendungen für Industrie, Wissenschaft und Medizin zulässig, ohne dass es dafür eine Lizenz braucht. Es wird auch ISM Band genannt (Industry, Science, Medical). Vorgegeben ist in Europa in der Norm EN 300 328, Ausgabe 1.7.1, die maximale Leistung (EIRP), maximal abgestrahlte Leistung von 100 mW zu jedem Zeitpunkt oder die Leistungsdichte von 10 mW/MHz Bandbreite, sowie dass in beiden Richtungen gesendet werden kann und soll.

In Amerika erachtet man die 100mW als mittlere Leistung und lässt kurzzeitig höhere Leistungen zu.

In diesem Frequenzband können also WLAN, Bluetooth, Industrie-, Telematik-anlagen und Fernsteuerungen betrieben werden. Gehen wir nun der Frage nach, warum man sich dennoch nicht gegenseitig stört, und wo die kritischen Punkte liegen.

Einen Quarz braucht es immer um eine stabile Grundfrequenz zu erzeugen. Mit einer Synthesizerschaltung kann aber beinahe jede beliebige Frequenz erzeugt werden. Bei einem Synthesizer Empfänger und Sender können also die gewünschte Frequenz (Kanal) programmiert werden und es reicht ein fest eingebauter Quarz. Dies hat noch nichts mit 2.4 GHz Anlagen zu tun und dies gibt es auch schon bei den 35, 40 und 72 MHz Anlagen.

Nun wieso muss man denn bei 2.4 GHz keine Frequenz eingegeben werden?

Grundsätzlich sendet ein 2.4 GHz Sender die Informationen in codierter Form. Der Empfänger muss auf diesen Code programmiert sein und wertet nur Signale vom Sender mit dem er gepaart ist aus. Bei den Fernsteuerungen nennt man dies „Binding“ bei Bluetooth Ohrhörern für das Handy „Pairing“. Sender und Empfänger müssen also gepaart sein. Der Empfänger muss den Code des Senders kennen um überhaupt wissen zu können auf welchen Sender er hören soll. Im nachfolgenden Vergleich könnte man dies mit der Stimme vergleichen, wenn mehrere Personen sprechen.

Man nennt dieses Übertragungsverfahren Codemultiplexverfahren (CDMA= Code Division Multiple Access). Das gleiche Verfahren verwendet man auch in der Mobiltelefonie bei UMTS und es nennt sich dort WCDMA, W für Wideband, also Breitband CDMA.

Dieses CDMA Prinzip muss man sich vorstellen wie wenn verschiedene Paare kommunizieren, wobei jedes Paar eine andere Sprache spricht, aber auf der gleichen Wellenlänge (Ausser bei Futaba, wo dann nach einem Reset alle wieder die gleiche Grundsprache sprachen, aber das war ein Ausrutscher von Futaba Ende 2007).

Mit anderen Worten im gleichen Raum können x Paare gleichzeitig kommunizieren und wenn sie dies alle in verschiedenen Sprachen tun, besteht keine Gefahr dass der Empfänger auf falsche Sprachen hört.

Nun ist es offensichtlich, dass sich so kommunizieren lässt, ohne dass man sich stört. Es kommt nun noch dazu, dass der Sender nicht immer sendet, sondern nur während wenigen Millisekunden etwas zu sagen hat und dann wieder ein mehrfaches an Zeit Pause macht.

Während dieser Pause verstehen sich dann andere Paare wieder besser (weniger anderssprachige Nebengeräusche). Und wenn der Empfänger mal ein paar Bit nicht versteht, dann wartet er einfach die nächsten Daten ab und gibt erst dann neue, veränderte Befehle an die Servos, wenn das System neue Befehle richtig gehört hat.

Jetzt gibt es aber grundsätzlich zwei verschiedene Prinzipien:

Frequenzhopping: FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum. Das System beruht auf 80 Kanälen zu 1 MHz Bandbreite. Der Sender springt immer alle 2 Millisekunden von einem Kanal zum nächsten - wechselt also 500mal in der Sekunde die Frequenz. Damit ist automatisches Ausweichen bei Störung garantiert. Es ist nur eine Frage der Zeit, nach ein paar Millisekunden hat man wieder ein freies Band. Dadurch hat man auch weniger Reflexion- und Multipath-Probleme (Abschattung), denn je nach Frequenz ändern sich diese Situationen auch. Es ist ein sehr störresistentes Verfahren. Nach diesem Prinzip funktioniert der Bluetooth Standard bei Handies und PC, sowie die Futaba Fernsteuerungen.

Bei dieser Technologie gelten die Maximalleistungen des Trägersignals und die Signale sind auch messbar (Leistungsspitzen auf immer anderen Frequenzen).

Und um wieder zum Vergleich mit der Sprachkommunikation zu kommen. Man wechselt dauernd die Tonlage nach einem definierten Muster, damit der Partner (Empfänger) nicht immer die nur „tiefes Deutsch“ neben dem „tiefen Russisch“ hören muss, sondern auch auf anderen Tonlagen hören kann was zu tun ist.

Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS, Codierung in direkter Folge und Übermittlung. Vor der Übermittlung wird zuerst gesucht, welcher Kanal am wenigsten gestört ist und dann genutzt. Nach diesem Prinzip funktionieren alle WLAN und die Fernsteuerungen von Spektrum, Graupner und andere aus Fernost, allerdings alle mit anderen Latenz- und Rahmenzeiten. Alle 20 bis 72 ms steht wieder neue Information für die Servos bereit.

Bei diesem Übertragungsverfahren wird mit kleinen Leistungen, dafür auf einer grösseren Bandbreite gesendet. Es ist kaum messbar und Empfänger erkennen trotzdem die „leise, fast geflüsterte“ Sprache, da hier die Tonlage nicht verändert wird.

Die Ausbreitungseigenschaften von 2.4 GHz Signalen mit 13 cm Wellenlänge sind anders als wir uns bei 40 resp. 35 MHz gewohnt sind:

- Hindernisse können zu einer Abschattung führen (Lichtähnliches Verhalten)
- Schlechtere Materialdurchdringung (Rumpfmateriale, wenn Antenne innen)
- Die Signalstärke verändert sich sehr dynamisch (Signalschwund bei sich bewegenden Objekten)
- Die Antennenrichtungen von Sender und Empfängerantenne sind viel wichtiger. Deshalb machen Systeme mit Diversity (2 Antennen) Sinn, weil dann die Wahrscheinlichkeit grösser ist zu jedem Zeitpunkt bei zumindest einer Antenne brauchbaren Empfang zu haben.
- Viel Reichweite bei wenig Leistung, aber wegen der starken Richtwirkung gilt viel Reichweite gleich viel Sicherheitsreserve nicht mehr.

Viel Leistung ist also nicht das Entscheidende, es gibt viel mehr Kriterien, die stimmen müssen. Der Empfänger hat aber soviel Intelligenz, dass bei nicht verstandenem Codes die Servos noch nicht in Endposition laufen, sondern warten bis der nächste Datenrahmen gut ankommt oder bei Frequenzhopping der nächste oder übernächste Kanal ungestört empfangen wird.

Nachfolgend nun aufgelistet welche Systeme aufgrund der verwendeten Verfahren mit welchen Leistungen senden. Wobei dies wie gesagt nicht die Reichweite wiedergibt. Wichtiger sind die vorher beschriebenen Kriterien und ob ein System bi-direktional arbeitet. Denn nur so erhält man dann auch Information vom Modell zurück auf den Sender (Signalqualität, aber auch Höhe, Motortemperatur, Batteriespannung, Vario, usw.)

System	Bandbreite	Leistung	Rückmeldung (bi-direktional) J/N
FHSS Futaba	80 Kanäle zu 1 MHz	100 mW	N
FHSS XPS Module,	5 MHz Bandbr., wechselt wenn gestört	50 oder 500mW	J
FHSS, ACT,	5 MHz und 2 parallele Systeme	2*5*10 = 100mW	J
DSSS	Spektrum sucht beim Einschalten einen freien Kanal	10...100mW	N
DSSS, Graupner (Spektrum)	2 Kanäle zu je 1 MHz	2*10 mW in EU	N

- XPS und ACT haben wirkliche bi-direktionale Kommunikation.
- XPS und Spektrum Steuerungen sind für die maximalen Leistungen je Erdteil programmierbar:
<http://www.xtremepowersystems.net/products.php?cat=11>
- Graupner vertreibt sowohl ein System wie XPS und nennt dies IFS und auch Spektrum Anlagen

Noch speziell erwähnen möchte ich JR Steuerungen, die auch auf der Technologie von Spektrum basieren, wobei es eine 9 und 12 Kanal Steuerung gibt. Dies natürlich mit den amerikanischen Sendeleistungen:

<http://www.jrradios.com/Products/Radios-Air.aspx>

Noch ein paar weitere Begriffe:

- Latenzzeit - Zeit ab Knüppelbewegung bis Servo reagiert
- GUID - Global Unique Identifier Code, Einmaliger Code, „Sprache im Vergleich“
- Auflösung - Auf der Übertragungstrecke kann man sehr viel mehr Daten übertragen, als eigentlich für die maximale Auflösung der Servos nötig ist. Ausser bei der ersten Spektrum DSM war es mit der Auflösung kritisch, das heisst ein gutes Digitalservo hätte eine bessere Auflösung gehabt als die Steuerung, aber dies ist jetzt bei allen neuen Steuerungen kein Thema mehr.

Hier ein Einstieg wer weiter gehen will als meine Erklärungen:

<http://www.jet-hangar.de/artikel/artikel.php?id=16>

Und so erklärt es der Experte aus Oesterreich, Rudolf Fiala, mit Links zu den Herstellern und dann noch viel detaillierteren Erklärungen als meine vereinfachten Ausführungen:

<http://members.aon.at/flug.fiala/2G4.html>

Und wenn es etwas Neues dazu gibt, dann auch bei uns:

<http://www.mgthun.ch/links.html>

Und nun zu meinem Fazit:

„Meine Wunschanlage“ gibt es noch nicht. Am nächsten kommt XPS mit Ihren HF Modulen für verschiedenste Sender und separaten Empfängern, und Futaba mit der neusten FF-10:

<http://2.4gigahertz.com/systems/futk9250.html>

Dieser FF-10 oder T10CAP Sender hat übrigens auf beiden Seiten Schieber, die bedienbar sein sollen, ohne dass man die Knüppel loslassen muss.

oder all den anderen Sendermodellen in den verschiedenen Preislagen:

<http://2.4gigahertz.com/systems/radiosystems.html>

und mit der stattlichen Anzahl an verschiedenen Empfängern:

<http://2.4gigahertz.com/modules/modules-receivers.html>

Und einen Downloadbereich für wer die einzelnen Produkte genau anschauen will:

<http://2.4gigahertz.com/downloads/downloads.html>

Und wenn jemand mit diesen englischen Futaba Links nichts anfangen konnte, dann hier doch noch, was Robbe auf 3 Seiten von obigem übersetzt hat:

<http://www.robbe.com/rsc/24fasst/index.htm>

Was mir noch fehlt bei diesen Anlagen ist die Möglichkeit der Rückmeldung vom Modell an den Sender wie Akkustand, Variometer, Höheninfo oder bei Motormodellen die Temperatur.

Von der Reichweite her mache ich mir weniger Sorgen, denn ein 3m Modell in 1200m Entfernung hat eine scheinbare Größe eines nur 1cm großen Modells in 4m Entfernung. Somit wäre von der Reichweite her sogar die Futaba Anlage ausreichend, was R. Fiala und andere genügend verifiziert und getestet haben. Ich warte trotzdem noch mit 2.4 GHz auf die Neuheiten 2009...

Reichweite und Sicherheit bei 2,4GHz-Technik

ACT September 2007 aus <http://www.acteurope.de/html/alles_zu_2_4ghz.html>

Für sicheren Betrieb einer 2,4GHz Fernsteuerung, auch jenseits 500m Entfernung, sind folgende Punkte zu beachten

- Bei Entfernungen jenseits 500m muss direkte Sicht bestehen zwischen Sender- und Empfängerantenne bestehen
- Jegliche Gegenstände, egal welches Material, zwischen den beiden Antennen, verringern die nutzbare Reichweite
- Größere Auswirkungen der Antennenpolarisation, Richtwirkungen müssen bei der Antennenverlegung im Modell und der Antennenposition am Sender beachtet werden
- Größere Auswirkungen von sog. Signalschwund bei sich bewegenden Funkzielen, der Effekt kann nur durch Diversity-Empfang beseitigt werden

Warum diese Erklärungen?

Bei 2,4GHz-Technik ist Vieles völlig neu, muss aber beachtet werden. Hier geht es nicht darum Angst zu machen, sondern die neu zu bedenkenden Effekte zu beschreiben. Es ist wie bei Allem, nur wer die Rahmenbedingungen kennt, in denen er sich bewegt, kann seine Situation richtig einschätzen und die richtigen Maßnahmen treffen, um erfolgreich seine 2,4GHz Fernsteuerung anzuwenden. Auch als Hilfe gedacht bei der Entscheidung 2,4GHz oder 35MHz.

Ausgangsbedingungen

War es bei **35MHz** Technik klar, dass ein direkter Zusammenhang zwischen Reichweite und Sicherheit auf der Übertragungsstrecke besteht, **mehr Reichweite = mehr Sicherheitsreserve**, so ist dies bei **2,4 GHz** Technik nun **nicht** mehr im direkten Zusammenhang zu sehen.

Physikalische Grundsätze, die jetzt bei 2,4GHz zu beachten sind:

Grundsatz 1:

Je höher die Frequenz, desto „lichtähnlicher“ die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen.

Auswirkungen: Es muß direkte Sicht bestehen zwischen Sender- und Empfängerantenne, **Gegenstände erzeugen Funk-Schatten**

Grundsatz 2:

Schlechtere Materialdurchdringung bei höheren Frequenzen

Auswirkungen: Jegliche Gegenstände, egal welches Material, zwischen den beiden Antennen, verringern die nutzbare Reichweite

Dazu kommen bei 2,4 GHz :

Größere Auswirkungen der Antennenpolarisation, Richtwirkungen werden stärker
Größere Auswirkungen von sog. Signalschwund bei sich bewegenden Funkzielen

Was bedeutet dies in der tatsächlichen Praxis ?

Ganz erheblich wirkt sich aus, ob direkte Sichtverbindung zwischen Sender- und Empfängerantenne besteht. Am Rande der Reichweite wirken dämpfend schon normale Materialien wie Holz im Modell, vor allem aber elektrisch leitende Gegenstände wie Kabel, Anlenkungen, Akkus usw. erzeugen Funk-schatten.

Gegenstände wie Bäume oder Personen in der Übertragungsstrecke können eine sofortige Unterbrechung der Funkverbindung bewirken. Liegen kleinere Hügel in der Strecke ist die Verbindung in jedem Fall unterbrochen. Selbst wenn diese Hindernisse neben der direkten Sichtverbindung liegen, können diese schon starke Dämpfungen erzeugen, bis hin zur völligen Signal-Unterbrechung. Es gibt die sog. Fresnelzone, die im Prinzip aussagt, dass auch Gegenstände innerhalb der Fresnelzone, gar nicht unbedingt in der direkten Sichtverbindung, sondern in gewissen Abständen daneben, schon Signaldämpfungen bewirken können (reflektive Auslöschung).

Schlechte Materialdurchdringung bei höheren Frequenzen reduziert die nutzbare Reichweite.

Größere Auswirkungen der Antennenpolarisation, Richtwirkungen werden stärker. Unabhängig von der Frequenz ist Antennenpolarisation eine physikalische Tatsache. Jede Antenne hat eine Pola-

risation und damit eine Richtwirkung. Im Ergebnis gibt es dabei Positionen zwischen Sender- und Empfängerantenne, die optimalen Empfang (max. Reichweite) ergibt und Positionen zwischen den beiden Antenne, die KEINEN Empfang ermöglicht. Da unser Modell sich bewegt, ergeben sich ständige Schwankungen des Empfangssignals auf Grund der Lageveränderungen zwischen den beiden Antennen. Dieser Richtwirkungs-Effekt wird größer mit steigender Frequenz. Daher ist die Ausrichtung der Antennen zueinander bei 2,4 GHz eminent wichtig und nur mit mind. 2 Antennen und Diversity-Technik lässt sich immer erreichen, dass eine der beiden Empfänger-Antennen optimal Ausrichtung zur Senderantenne hat.

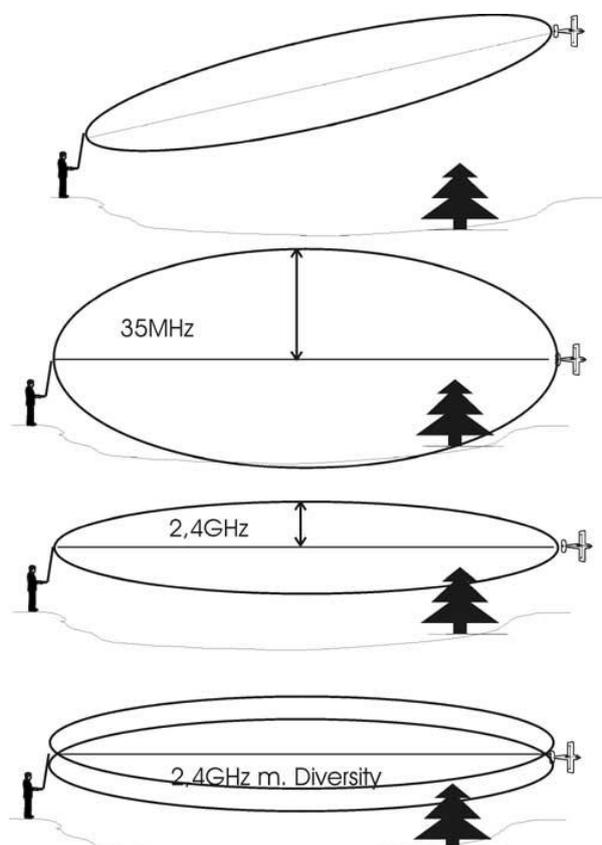
Größere Auswirkungen von sog. Signalschwund bei sich bewegenden Funkzielen

Signalschwund ergibt sich prinzipiell bei sich bewegenden Funkzielen. Die Auswirkungen sind die selben wie bei den Richtwirkungen ->, ständig schwankende Signalstärke am Empfängerantennen-eingang. Schwund ist abhängig vom Untergrund, also Bodenbeschaffenheit in Verbindung mit Richtungen usw., und wirkt erdnah, also bis zu ca. 1000m Höhe. Leider ist Schwund nicht linear und tritt auch nicht immer gleich stark auf. Deshalb gilt auch hier, mindestens zwei Empfängerantennen und Diversity-Technik sind notwendig, um die Wirkungen zu reduzieren. Je höher die Frequenz, desto größer die Wirkungen von „Schwund“.

Die Punkte 2-5 reduzieren letztlich immer die Reichweite, die sich aus Punkt 1 ergibt. Diese Physik lässt sich leider nicht umgehen, daher ist es zur Erzielung einer optimalen, sicheren Reichweite notwendig, alle möglichen Gegenmaßnahmen zu treffen.

Fresnelzone

Es gibt die sog. Fresnelzone, das ist ein gedachtes Elypsoid der Funkwellenausbreitung, benannt nach dem französischen Physiker Fresnel. Der Durchmesser der Fresnelzone ist bei höheren Frequenzen kleiner, die Auswirkungen von Sichthindernissen daher im Verhältnis größer (lichtähnliche Ausbreitung). Die Fresnelzone sagt im Prinzip aus, dass auch Gegenstände innerhalb der Fresnelzone, gar nicht unbedingt in der direkten Sichtverbindung, sondern in gewissen Abständen daneben, schon Signaldämpfungen bis hin zu Signalauslöschungen bewirken können (Reflektive Auslöschung). Wegen der schlechten Materialdurchdringung bei 2,4 GHz sind hier die Auswirkungen größer als bei 35MHz.



Sieht ungefähr so aus. (s. Wikipedia)

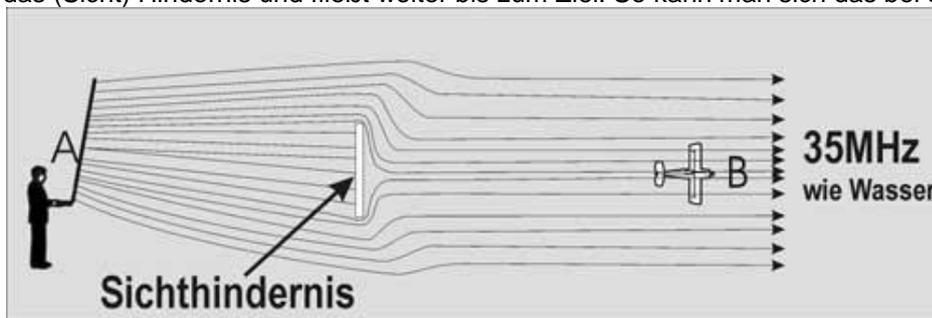
Klar, wie fliegen oben in der Luft, da spielen Einflüsse der Fresnelzone keine Rolle, aber was ist bei der Landung, möglicherweise eine ungewollte Außenlandung in größerer Entfernung? Bei 35 MHz kein Problem.....

Wichtig zur Erhöhung der nutzbaren Reichweite ist daher, **weit auseinander liegende Antennen** (Sender und Empfänger) zu installieren. Dies minimiert die räumlichen Auswirkungen von Hindernissen in der Sichtlinie. Am Sender z.B. durch das Hirschkäfer-Prinzip, an den Empfängern durch weit auseinander liegend montierte Antennen.

Zum besseren Verständnis der Funkwellenausbreitung ein Vergleich (nicht unbedingt wissenschaftlich, aber verständlich):

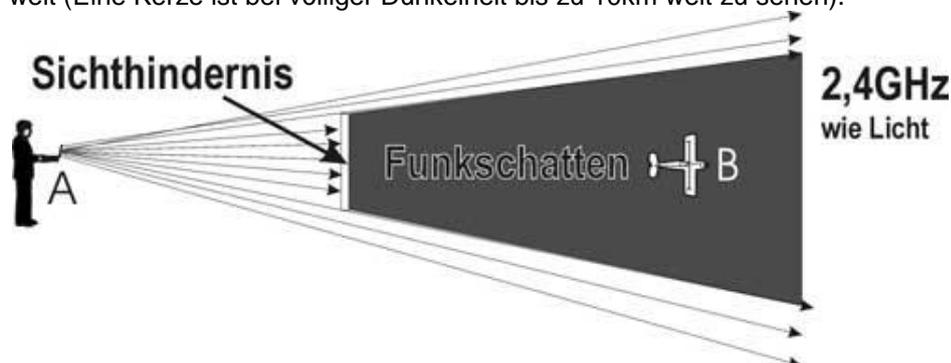
35MHz

Nehmen wir einen Fluss als Funkstrecke, das Wasser (35MHz, elektromagnetische Funkwellen) ist das Übertragungsmedium mit dem unsere Steuerinformation übertragen wird, welche von Punkt A zu Punkt B gelangen soll. Ohne Hindernis geht das natürlich ohne jegliche Probleme. Jetzt stellen wir ein Hindernis, eine Wand, nicht so breit wie der Fluss, in die Fluten, genau auf der Sichtlinie. Kommt dann noch Wasser, unsere Steuerinformation, an Punkt A an? Jeder weiß, ja, natürlich. Wasser umfließt das (Sicht) Hindernis und fließt weiter bis zum Ziel. So kann man sich das bei 35MHz vorstellen.



2,4GHz

Jetzt machen wir das selbe, aber nicht in einem Fluss mit Wasser(35MHz). Wir nehmen als Übertragungsmedium für unsere Steuerbewegung einfach Licht (2,4GHz, elektromagnetische Funkwellen hoher Frequenz). Wir stellen bei Punkt A eine Lichtquelle auf und wollen, dass das Licht dieser Lichtquelle an Punkt B ankommt. Ohne Hindernis geht das auch hier ganz problemlos und vor allem sehr weit (Eine Kerze ist bei völliger Dunkelheit bis zu 10km weit zu sehen).



Nun stellen wir wieder unsere Wand in die Sichtlinie. Das ergibt einen Licht-Schatten, in dem unser Funkziel, der Punkt B liegt. Wie jeder weiß, kommt damit kein Licht, und damit keine Steuerinformation an Punkt B an. So muss man sich das bei der Frequenz 2,4GHz vorstellen. Hinweis: In Entfernungen zwischen 200-400m muss nicht unbedingt direkte Sichtverbindung herrschen, leider lassen sich diese Bedingungen aber nicht genau definieren, sie können stark variieren.

Wichtig ist aus all diesen Gründen nicht die ENDRICHWEITE eines RC-Systems, sondern die nutzbare Reichweite

Nutzbare Reichweite

Nutzbare Reichweite, unabhängig von der Frequenz, definiert sich ja unstrittig durch die erzielbare Reichweite unter den schlechtest möglichen Bedingungen während eines Fluges.....

Es nützt nichts, wenn 90% der Betriebszeit 5 km Reichweite anliegen, aber in 10% der Zeit nur 100Meter, z.B. durch Richtwirkungen und/oder Schwund oder Unterbrechung der Sichtverbindung.....

Ab wann spielen daher Einbauprobleme durch Kabel, bordinterne Störquellen, schlechte Antennenlage, Fresnelzone, schlechte Sichtverbindung, hohe Funkumweltbelastung von außen, usw. keine Rolle mehr?

Bis zu welcher Entfernung, auch unter den schlechtest möglichen Bedingungen, ist ein Modell immer sicher zu betreiben ?

Diese Fragen muss ein RC-System beantworten, die maximale Reichweite ist nicht von Bedeutung.

Man kann nun als Hersteller nicht jedes Modell nachstellen auf einer Teststrecke, wir haben deshalb für unsere Systeme folgenden Aufbau gewählt, der bestimmte Probleme definiert berücksichtigt: In 10m Abstand vom Sender steht eine Person in der Sichtlinie zwischen Sender und Empfänger. In 10m Abstand vom Empfänger steht in der Sichtlinie eine weitere Person. Damit muss unser System noch in 1000m Entfernung am Boden arbeiten und in 2000m noch Steuerbefehle ermöglichen.

Bemerkung am Rande: Die parallel betriebenen 35MHz Diversity-System haben unter allen diesen Bedingungen auch immer einwandfrei gearbeitet.

Wir sind sicher , dass sich die moderne 2,4GHz Technik im Flugmodellbau durchsetzen wird.

Wie auch immer, wir freuen uns auf die neue Technik.

Die neue Fernsteuerfrequenz 2.4 GHz in Europa

Rechtliches

© Rudolf Fiala, 19. 3. 2007, **26. 10. 2009, 24.3.2011, 11.8.2011 (Veröffentlichter Entwurf der neuen Norm)** aus <<http://members.aon.at/flug.fiala/2G4.html>

Das ISM-Band ist derzeit für alle Anwendungen erlaubt. Eine Änderung ist derzeit nicht befürchtbar.

24.3.2011: Gesetzeslage noch immer unverändert, die Änderung der Europa Norm 300328V1.7.1 auf V.1.8.1 ist in Ausarbeitung. Zeitpunkt des Inkrafttretens dürfte Ende 2012 sein und die Auswirkungen auf im Handel befindliche DSSS-Fernsteuerung ist noch nicht öffentlich bekannt.

Zeitplan der V.1.8.1 siehe: [ETSI](#)

Aktuell September 2008: Fernsteuerungen werden nicht verboten, die Norm ist aber zu überarbeiten, um die derzeit bestehende Unsicherheit in der Rechtslage zu beseitigen. [Auszug aus dem TCAM 26 Meeting und Originallink hier](#)

Diese Zusammenfassung für Newcomer und nicht-Forenbesucher erklärt einige Begriffe und Details, die in technischen 2.4GHz-Angaben und Diskussionen immer wieder vorkommen und Verwendern der bisher üblichen Fernsteuerfrequenzen nicht sehr geläufig sind.

2.4GHz-Frequenz: Das ist eine der unter bestimmten Regeln für jeden Verwendungszweck freien ISM-Frequenzen im Dezimeterwellenbereich. Die Wellenlänge dieses Bandes ist ca. 13cm.

ISM-Bänder: "Industrial, Scientific, Medical" verwendbare Frequenzen, die im uns interessierenden Sendestärkenbereich keiner Genehmigung bedürfen, sofern die international vereinbarten Regeln über gegenseitige Störungslosigkeit eingehalten werden. Eine der möglichen Verwendungen ist eben die Fernsteuerung von Modellen. [Informationen zum ISM-Band hier](#)

Gegenseitige Störungslosigkeit: wird durch spezielle Verschlüsselungsmethoden erreicht, einem "Hineinhören" des Senders auf freie Teil-Frequenzen ("**Slots**" oder eigentlich überholt "Kanäle") und/oder schnelle zwischen Sender und Empfänger vereinbarte Frequenzsprungverfahren. Da ist eine extrem schnelle und hoch redundante Einwegkommunikation (Futaba FFAST, kommt in Bälde) oder Zweiwegkommunikation zwischen Sender und Empfänger mit Auswahl/Vereinbarung freier Slots, auch im Flug (Zeitverlust beim Steuern?) möglich.

Verschlüsselungsmethoden:

- **"Binding":** Jeder Empfänger wird an seinen Sender durch einen Sendernamen ([Globally Unique Identifier](#)) gebunden und interessiert sich nicht für andere Sender. Auch wenn ein anderer Sender gerade auf der gleichen Slot-Frequenz senden würde.
- **"Chipping":** Jede gesendete Information, wie zB. die Impulsinformationen für die Servos, wird nochmals mittels spezieller Verfahren unverwechselbar verschlüsselt. Fremde Impulse auf der gleichen Slotfrequenz werden schlicht gar nicht erkannt.

Falscher "Schlüssel" eben für das "Schlüsselloch". [Erklärt bei Wikipedia-Spreizcode.](#)

Informationsübertragungs-Kapazität: Die ist im Vergleich zu 35MHz mindestens 68 mal größer, daher sind auch viel mehr sicherheitssteigende Lösungen mittels der verwendeten Schaltungsteile möglich.

10/2007 Zweiwegkommunikation zwischen Sender und Empfänger: Der Empfänger sendet Daten an den Sender und muss dazu auch in ähnlicher Sendestärke senden wie der Bodensender. Die Daten können zB. die Empfängerbatteriespannung oder Variometerdaten etc. etc. sein.

Viel interessanter ist aber Folgendes: Der Empfänger kann an seinem Empfangsort - der einzig richtigen Stelle! - die Frequenz scannen und als annehmbar sauber befundene Teilfrequenzen ("Slots") seinem Bodensender zur "Vormerkung" senden, der bei einem störungsbedingt durchzuführenden Frequenzwechsel auf eine dieser vom Empfänger als gut befundenen und "vorgemerkten" Frequenz wechseln kann.

Durch die nur kurzzeitige Servo-Informationsübermittlung in "Bursts" von zB 4ms Sendezeit pro 20ms Wiederholzyklus (Frame) wäre bei diesem Beispiel 80% der Zeit für Scannvorgänge und Rückübermittlung an den Sender verfügbar.

Bis Dezember 2007 hat sich aber herausgestellt, dass das Frequenzwechselverfahren von XPS/iFS scheinbar nicht zu 100% den Erfordernissen der Modellfliegerei entspricht: der "Erfinder" Jim Drew hat das selbst zugegeben. Außerdem wurde von mir der FHSS-Bluff aufgedeckt, der auf einer Gesetzeslücke/Interpretationslücke der Norm EN 300 328 in den Version 1.6.1. aber leider auch in ähnlicher form in der Version 1.7.1 beruht.

Siehe [hier Seite 3 ab 6.12 beginnend](#)

Funksicherheit auf 2.4GHz:

- Dieses Band kennt **keine Überreichweiten** wie 35Mhz und ist auf die Sichtweite begrenzt. (Für mitlesende Spezialisten: Mit Ausnahme von reflektorischen Mehrweg-Übertragungen und Beugung bei gestörtem direktem Sichtkontakt.)
- die **Abschwächung** der Funksignale ("Freiraumdämpfung") ist wesentlich größer als bei 35MHz.
- ebenso die **Dämpfung hinter Mauern**, wichtig da es ja auf dem Band viele andere Heim- und Büroverwender gibt.
- und siehe oben "Binding" und "Chipping". Dazu kommt noch die 2.4GHz üblichen Mehrfrequenzverfahren, Burst-(Kurzpuls-)Verfahren, Hoch [redundante Mehrfachübertragungen](#), Frequenzsprungverfahren und Zweiwegkommunikation. Dazu kommt noch [Antennen- und Empfänger-Diversity](#) gegen das Hauptproblem auf dieser Frequenz bei größeren Entfernungen, nämlich der Abschattung durch größere im Modell vorhandene leitfähige Materialmassen wie einem großen Motor, die u.a. durch die kleinen Empfangsantennen (3-6.5cm) hervorgerufen wird.

Ausfliegbare Reichweiten: Hier gibt es je nach Kontinent oder Land unterschiedliche Angaben oder sogar Einschränkungen.

Hier sei immer auf die Angaben des Importeurs/Generalvertreters verwiesen, die sich u.U. deutlich von den Herstellerangaben unterscheiden.

Möglicherweise auch manchmal mit für einen künftigen Kunden nicht nachvollziehbaren Gründen, die aus firmenzentrierten Marketinggründen oder auch schlicht aus Druck-

fehlern und/oder Textabschreibungen resultieren. Die international erprobten Reichweiten sind teilweise bis zu 10fach größer als für "Parkflyer, small Foamies and Microhelis" angegeben. (Gilt NICHT für den CX2-Koaxheli mit LP5 Sender, der geht tatsächlich nur ca. 180 Schritte weit.)

Rechtlicher europ. Stand der Dinge bezüglich Verwendung von DSSS mit mehr als 10mW noch immer nicht (26.10.2009) geklärt.

FHSS wie Futaba FASST ist bis 100mW rechtskonform.

Gerüchte seit Mitte 2008 wirksam werdende Einschränkungen betreffen nicht bis dahin erworbene, nach derzeitigem Recht zulässige Fernsteuerungen. Nennt sich "Bestandschutz". Aber das ist für DSSS heute (26.10.2009) auch nicht sicher!!

Graupner beendete den Verkauf der Spektrum-Fernsteuerung, JSB übernimmt zwischen-durch und ist seit ca. Mitte 2008 mit der neuen Firma Horizon Hobby Deutschland GmbH verschmolzen. Rechtslage DSSS mit mehr als 10mW nach wie vor ungeklärt.

Zur Gesetzeslage:

Die in Österreich bereits gültige Norm EN 300 328 Version 1.7.. ; Deutschland erst ab Mitte 2008, eventuell unter Wegfall der Leistungsgrenze bei 2454 MHz

Achtung: Der vollständige Text der Norm enthält einen Definitionsfehler, der es unter bestimmten Voraussetzungen erlaubt, die Kriterien von FHSS mit einem DSSS-System zu unterlaufen und statt der für DSSS erlaubten 10mW pro 1 Mhz Spread-Breite mit höheren Leistungen zu senden.

Hier sei auch ergänzend vermerkt, dass in Österreich laut Mail des zuständigen Ministeriums die Grauner-DX7 als Short Range Device (Sub-class 21) gilt und auf 10mW begrenzt ist. Das wurde Graupner auch mitgeteilt. JSB und Nachfolger Horizon-Europa ist das möglicherweise nicht bekannt.

Eine Veröffentlichung des Österr. Aeroclub im Juli 2008 erweckte allerdings den Eindruck, dass zumindest die Einschränkung auf die Subclass-21 mit prinzipiell nur erlaubten 10mW gefallen sei. Das ist zwar prinzipiell richtig, ist aber in allen Auswirkungen noch ungeklärt, auch weil die Norm noch unverändert besteht.

Was allerdings ausdrücklich(!) nichts an der Zuständigkeit und den Einschränkungen der in Überarbeitung befindlichen SubClass-22 bei DSSS für Fernsteuerungen ändert.

Sub-class 22 Rev. 2

<i>Parameter</i>	<i>Description</i>	<i>Comments</i>
Frequency band	2400 – 2454 MHz	
Radio service according ITU Radio Regulation	Mobile Service	
Application	Wideband Data Transmission Systems	Wireless networking devices (including ad-hoc networking) for the transmission of Data (including digitized audio and video). Eg., technologies such as WiFi, Bluetooth™, HomeRF™, Zigbee™, etc.
Channel Spacing	not defined	
RF – Power	not defined	
RF – Radiated Power	100 mW eirp	For wide band modulations other than FHSS (e.g. DSSS, OFDM, ..), the maximum e.i.r.p. density is limited to 10 mW/1 MHz
Transmit / Receive spacing (Duplex direction)	not defined	
Type(s) of modulation	not defined	
Duty cycle	≤ 100 %	Devices use a medium access protocol designed to facilitate spectrum sharing
Harmonised Standard representing the state of art	EN 300 328	
Equipment class according to Commission Decision 2000/299/EC	Class 1	

<i>Parameter</i>	<i>Description</i>	<i>Comments</i>
Frequency band	2400 – 2483.5 MHz	
Radio service according ITU Radio Regulation	Mobile Service	
Application	Wideband Data Transmission Systems	Wireless networking devices (including ad-hoc networking) for the transmission of Data (including digitized audio and video). Eg., technologies such as WiFi, Bluetooth™, HomeRF™, Zigbee™, etc.
Channel Spacing	not defined	
RF – Power	not defined	
RF – Radiated Power	10 mW e.i.r.p.	For wide band modulations other than FHSS (e.g. DSSS, OFDM, ..), the maximum e.i.r.p. density is limited to 1 mW/1 MHz
Transmit / Receive spacing (Duplex direction)	not defined	
Type(s) of modulation	not defined	
Duty cycle	≤ 100 %	Devices use a medium access protocol designed to facilitate spectrum sharing
Harmonised Standard representing the state of art	EN 300 328	
Equipment class according to Commission Decision 2000/299/EC	Class 1	

Aktuell September 2008: Fernsteuerungen werden nicht verboten, die Norm ist aber zu überarbeiten, um die derzeit bestehende Unsicherheit in der Rechtslage zu beseitigen.
[Quelle hier](#)

Auszug aus dem TCAM 26 Protokoll:

[Das Original hier klicken](#)

Daraus der Einleitungssatz:

*Sub-class 22 in the 2400-**2454** MHz band is constituted by Short Range Devices (SRDs) using appropriate mitigation techniques that are therefore allowed to operate at 100 mW e.i.r.p., whatever type of application they implement (RLAN access, inter-device communication, control of model airplanes, microphones, etc.).....*

Daraus ist ableitbar, dass Futaba mit dem "France"-Schalter das Richtige gemacht hat!

Und dazu aktuell 27.9.2008:

der gestrige Tag mit der bestätigten Gründung der Interessensgemeinschaft aller Firmen und deutschen Modellflugverbände hat dank der Pressemitteilung vom 27.9.08 endlich Klarheit über das Gerücht gebracht, dass eine große Zusammenarbeit geplant ist.

http://www.rc-network.de/magazin/artikel_08/art_08-061/art_061-01.html

11.8.2011: Entwurf neue Norm EN 300 328 V.1.8.0:

http://pda.etsi.org/exchangefolder/en_300328v010800c.pdf

oder, wenn es nicht funktioniert:

http://pda.etsi.org/pda/home.asp?wki_id=x4_QU0Nn4ZSUZZYS%27hIG%27

Gültig wird dieser Entwurf für die Verkäufe der Firmen ca.(!) Ende 2012, bis dahin gekaufte Anlagen können unbeschränkt weiter verwendet werden.

Frequenzbänder im RC Modellbau | RC Modellbau Blog

Geschrieben von [Klaus](#) am 31. März 2010

aus <http://www.rc-modellbau.de/frequenzbänder-im-rc-modellbau.html>

Im Prinzip können wir unsere Fernsteuerung auf jeder x-beliebigen Frequenz senden lassen. Aber weil wir ja nicht alleine auf der Welt sind und es noch mehr Leute und Dinge gibt, die per Funkwellen senden und empfangen, hat der Gesetzgeber schon vor lange Zeit die unendliche Vielzahl an Frequenzen in Bereiche aufgeteilt. Und diese Bereiche nennen sich Bänder bzw. Frequenzbänder.

Frequenzbänder für den RC Modellsport

Da gibt es dann ein Band fürs Radio, für Fernsehen, für den Amateurfunk, für das Militär, und dann Bänder, die wir für den Modellsport benutzen dürfen: 27 MHz, 35 MHz, 40 MHz, 433 MHz und 2,4 Ghz. Band bedeutet also, dass in diesen Bereich ein genau definiertes Spektrum an Frequenzen genutzt werden darf, z.B. erstreckt sich das 35MHz Band von 35,010 MHz und 35,200 MHz.

Kanäle

Diese Bänder sind nochmals in kleine Bereich, die Kanäle, unterteilt. Diese Kanäle haben eine Breite von 10 KHz. Eine Fernsteuerung arbeitet immer auf einem Kanal. Und sie arbeitet nur störungsfrei wenn innerhalb der Reichweite (ca. 1-2km) kein Anderer auf dem gleichen Kanal sendet!

Bänder

Was wo gesendet und betrieben werden darf, hat der Gesetzgeber auch klar geregelt. Auf 27 MHz tummeln sich nicht nur Modelle, sondern auch CB-Funker und andere. Das macht das 27 MHz Band denkbar ungeeignet für uns Modellbauer, vor lauter Störungen kommen wir zu nichts.

Das 40 MHz Band ist dagegen nur für Modelle reserviert, was die Störungen erheblich verringert. Jedoch kann es natürlich sein, dass wir mit unserem Flugmodell gestört werden, weil hinter dem nächsten Busch jemand sein Modellschiff steuert.

Deshalb hat der Gesetzgeber das 35 MHz Band nur für die Flugmodelle reserviert. Es ist halt doch etwas anderes, ob ein Schiffsmodell stehen bleibt oder ein Flugmodell abstürzt: die Folgen können sehr groß sein! Also bitte niemals ein Schiff oder ein Auto auf 35 MHz steuern wollen! Und weil das ursprüngliche 35 MHz Band langsam voll wurde, weil es mehr und mehr Modellflieger gab, hat der Gesetzgeber uns noch ein zweites Spektrum im 35 MHz Band freigegeben (35,820 MHz und 35,900 MHz). Nun haben wir als das 35MHz A-Band (Kanal 61-80) und das 35MHz B-Band (Kanal 182-191).

Ein Exot ist das 433MHz Band. Früher gab es einige wenige Hersteller, die Fernsteuerungen verkauften, die auf diesem Band arbeiten, Es hat sich aber nicht durchgesetzt, weil es eben nicht nur für Flugmodelle reserviert ist. Dort senden aber auch zum Beispiel Varios und Telemetriesysteme, die Daten aus dem Modell an uns zurücksenden.

Das Band der Zukunft: 2,4 GHz

Und dann natürlich das 2,4GHz Band: das ist erst kürzlich freigegeben worden und ist zwar im Prinzip auch in Kanäle unterteilt, aber es gibt wegen der hohen Frequenz derart viele davon, dass sie nicht mehr durchnummeriert werden. Das merken wir Modellsportler daran, dass unsere 2,4GHz-Fernsteuerung keinen festen Kanal mehr hat und wir ungestört und ohne Absprache mit den Kollegen unsere Fernsteuerung einschalten können, ohne Angst zu haben, den Freund zu stören. Das ist das Band der Zukunft, gleich ob Flug, Schiff, oder Auto!

Aber keine Sorge wegen der ganzen Zahlen und Vorschriften, die Hersteller unserer Fernsteuerung halten sich streng an alle diese Vorschriften. Was wir also hier in Deutschland kaufen können, dürfen wir in der Regel auch benutzen! Wenn ihr auf Markenhersteller wie z.B. Futaba vertraut, dann seid ihr auf der sicheren Seite.

Spread-Spectrum, das unbekannte Wesen

aus http://www.rc-network.de/magazin/artikel_05/art_05-059/art_059-01.html

Frank Tofahrn



Stand:18.11.2005

Im Magazin von RC-Network wurde im Artikel [Multiple Access Verfahren bei R/C-Anlagen](#) bereits die Möglichkeiten moderner Vielfachzugriffsverfahren in der Funktechnik beschrieben. Dieser ergänzende Artikel soll die dort kurz angerissenen Verfahren etwas genauer beleuchten, um die Funktionsweise und die grundsätzlichen Hintergründe dieser Technik zu erklären.

Es werden dabei vorzugsweise die Geheimnisse einiger Spread-Spectrum-Techniken gelüftet.

Zuerst eine schlechte Nachricht:

Es gibt so etwas wie „Die Theorie der Nachrichtentechnik“, der wir uns dabei zwangsläufig etwas nähern müssen, wollen wir das ganze Zeug auch nur ansatzweise verstehen. Tauchen wir ab in die unbekanntes Tiefen der grauen Theorie...

Grundlagen

Wie fast die gesamte Elektrotechnik, hat auch die Spread-Spectrum-Technik eine mathematische Grundlage. Als einleitende Maßnahme steigen wir ein in die Mathematik der Informationstheorie der Nachrichtentechnik (für die Mathematiker unter uns: das Folgende ist nicht ganz ernst gemeint und etwas satirisch angehaucht).

Gegeben sei Folgendes:

$$1 + 1 = 2$$

Wir hoffen alle, dass das stimmt.

$$E = m \cdot c^2$$

Behauptet Einstein

Neujahr fällt immer auf den 1. Januar

Das ist sicher

$$C = 2 \cdot B \cdot \text{ld}(M)$$

So sagte Nyquist

C - ist die Kanalkapazität (oder Nyquistbandbreite)

B - die Datenrate

M - die Anzahl der Zustände

Kurze Erklärung: Die Herren Nyquist und Shannon haben die theoretischen Grundlagen der Nachrichtentechnik formuliert. Und das schon zu Zeiten, als die Buschtrommel noch modern war. Ihre Theorien gelten ungeachtet ihres Alters auch noch heute, sogar für moderne Kommunikationssysteme mit vielen Gimmicks und Gags.

Nach einigen trivialen mathematischen Umformungen (duck-und-wech) kommen wir zu folgendem Ergebnis:

„Je größer das Verhältnis zwischen Nyquistbandbreite und tatsächlich benutzter Bandbreite im Funkkanal ist, um so störungsresistenter ist die Übertragung (wenn man es richtig anstellt).“

Ist doch vollkommen einsichtig, oder?

Ich glaube, ich bin jetzt eine Erklärung schuldig. Also, dann wollen wir mal.

Kanalkapazität

Von den oben erwähnten mathematischen Voraussetzungen überspringen wir die ersten drei und gehen direkt zur Nyquistbandbreite. Mit dieser Formel kann man die benötigte Kanalkapazität einer digitalen Übertragung berechnen, mit der die Information unverfälscht(!), gut merken, ist wichtig, übertragen werden kann. Wenden wir das auf unsere Fernsteuerungen mit einer binären Übertragung ($M = 2$) an, ergibt sich:

$$C = 2 \cdot 3300 = 6600 \quad (\text{ld}(2) = 1 \text{ und fällt daher heraus})$$

Theoretisch brauchen unsere Anlagen also einen mindestens 6,6kHz breiten Kanal, um unsere Information unverfälscht und eindeutig übertragen zu können. Das gilt allerdings NUR(!) für ein ideales Übertragungsverfahren. In der Praxis werden daraus, durch das begrenzt ideale Verfahren FM, dann doch immerhin 10kHz.

Kanalerschöpfung

Im Umkehrschluss bedeutet das, in diesen Kanal passt nur genau das gewünschte Signal hinein und mehr nicht! Auch keine Störungen. Sind in dem benutzten Kanal zusätzliche Signale, also z.B. Rauschen oder diskrete Störer, ist der Kanal überlastet bzw. erschöpft. Die obige Betrachtung gilt daher nur für einen ungestörten, rauschfreien Kanal. Wird der Kanal über seine Kapazität hinaus belastet, wird die Information darin verfälscht. Beim Rundfunk mag das ja noch akzeptierbar sein. Die Musik hört sich schlimmstenfalls nur etwas komisch an, bei uns fallen dann aber gleich die Flieger vom Himmel.

Bandbreitenüberschuss

Transportieren wir unsere Information jedoch in einem Übertragungskanal, der wesentlich breiter ist als es eigentlich notwendig wäre, haben wir viel Platz für Störungen wie Rauschen oder Fremdsender. Je größer dieses Verhältnis ist, um so mehr Störungen können ohne negative Folgen verkräftet werden.

Dazu mal ein anschauliches Beispiel als Gedankenexperiment:

Zur Kanal- oder hier eher Tunnelkapazität

Stellen wir uns unseren Übertragungskanal als einen Tunnel vor. So einen von der alten, unsicheren Art. Eng, dunkel, feucht und einspurig. Durch diesen wollen wir unsere Informationen schicken. Da es unsere Informationen ja bequem haben sollen, setzen wir jede in ihren eigenen 5-Meter-Luxusschlitten.

Nehmen wir ferner an, der Tunnel sei 100m lang. Dann passen da genau 20 Luxusschlitten hinein, ohne dass es Beulen gibt. Der Tunnel (also unser Kanal) ist damit erschöpft. Pressen wir aber mit Gewalt 21 Luxuskarossen rein, sehen die mit Sicherheit alle ziemlich ramponiert aus, wenn sie am anderen Ende endlich herauskommen. Die Übertragung ist dann nicht mehr unverfälscht, die Luxusschlitten sind verbeult und die Autowerkstatt reibt sich die Hände. Wir können nur noch hoffen und beten, dass unsere Informationen durch Sicherheitsgurte, Gurtstraffer und Airbags gut geschützt waren. Wenn nicht, können wir „good bye“ sagen zu unseren Informationen und damit zu unserem Modell.

Zur Kapazitätserschöpfung

Um die Situation noch zu verschärfen, stellen wir uns nun zusätzlich vor, eine der Luxuskarossen hätte 'ne Panne und bliebe liegen. Was wäre dann? Die Durchfahrt wäre blockiert, Ende, aus, Feierabend. Rien ne vas plus, nichts geht mehr. Bei einer Störung bricht in so einem Tunnel sofort alles zusammen.

Zum Bandbreitenüberschuss

Jetzt stellen wir uns zur Abwechslung vor, unser Tunnel wäre neu, hell, trocken und 4-spurig. Unsere 20 Luxusschlitten müssten auch durch diesen hindurch. Leider bleibt jetzt ebenfalls einer liegen und blockiert eine Spur. Wenn sich alle Anderen einigermaßen geschickt anstellen, macht das fast nichts aus. Hier ist ja Platz genug für alle da.

Gut, es werden sich ein paar Sonntagsfahrer finden, die selbst dann noch einen Stau produzieren, weil sie mit der Situation überfordert sind. Wenn aber gerade nicht Sonntag ist, könnte man in dieser Situation mit einer Störung ganz kommod leben.

Ende des Gedankenexperiments.

Machen wir wieder den Schwenk zur Nachrichtentechnik. Benutzen wir also für unsere Informationsübertragung einen Kanal, der bis zur Oberkante ausgereizt ist, wird die ganze Geschichte sehr sensibel auf Störungen reagieren. Spendieren wir der Information hingegen einen komfortablen, breiten Übertragungskanal, der ein Vielfaches der eigentlich benötigten Kapazität bereitstellt, sind wir in der glücklichen Lage, Störungen einfach umschiffen zu können, so man eine Hardware hat, die diesen theoretischen Vorteil auch zu nutzen versteht.

Genau das ist die zentrale Idee hinter allen Spread-Spectrum-Konzepten!

Ist ja eigentlich ganz simpel und anschaulich, nur muss man dieses Konzept erst mal in Funkhardware meißeln können.

Jede Spread-Spectrum-Technik basiert darauf, dass der benutzte Übertragungskanal wesentlich breiter ist als die eigentlich notwendige Bandbreite nach Nyquist.

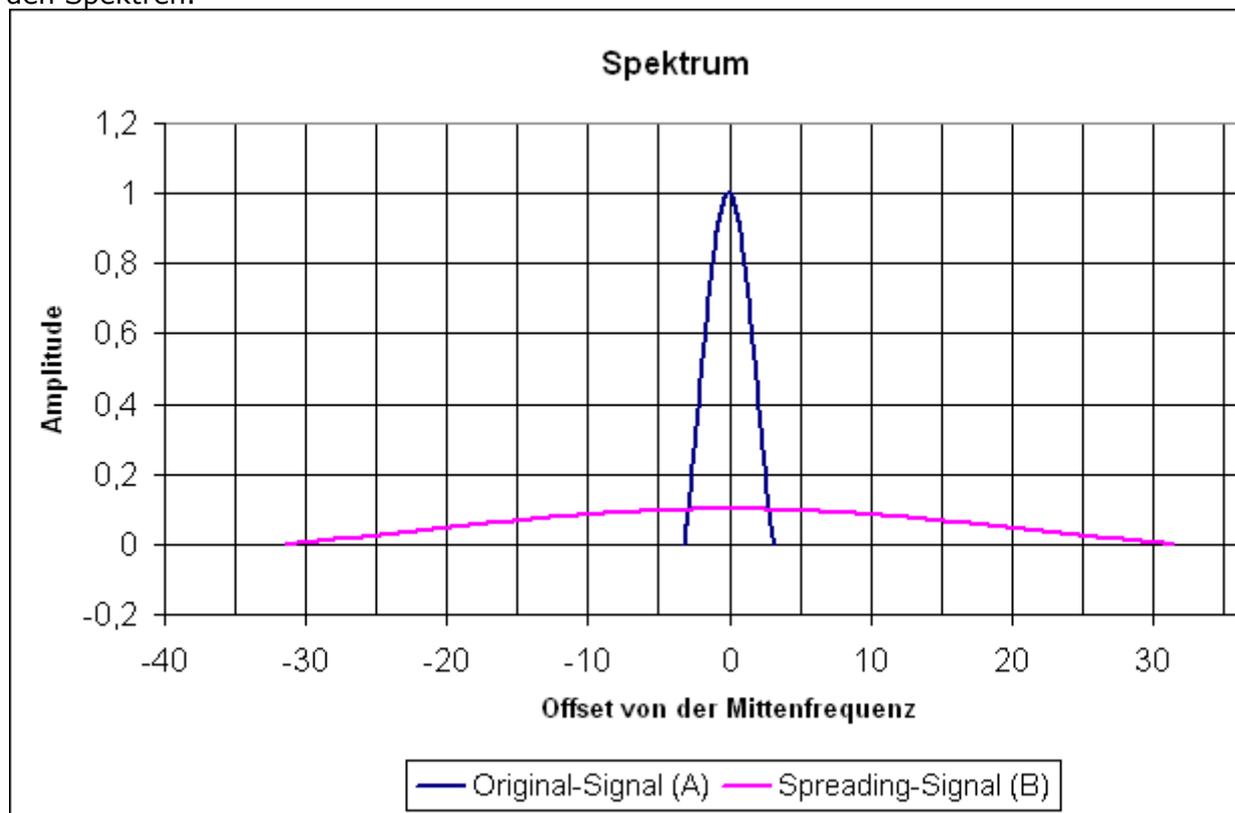
Dank der großen Bandbreite stellt der Übertragungskanal soviel Platz zur Verfügung, dass auch Störungen genug Raum haben. Die Kunst in der Implementation solcher Systeme ist ganz einfach die, auf der Empfängerseite Nutz- und Störsignal auseinander halten zu können. Um dieses zu erreichen, muss auf der Senderseite die Nutzinformation mit einer hinreichend eindeutigen Duftmarke (puhh, Nase-zu-halt) versehen werden. Dazu gibt es mehrere Ansätze, von denen wir hier einigen unter den Rock schauen wollen.

Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

Bei diesem Verfahren wird der eigentlichen Information großzügig Dummy-Information hinzugefügt. Die Menge dieser Dummy-Information beträgt dabei ein Vielfaches des eigentlichen Informationsumfangs (so ab dem Faktor 8 wird das interessant, kann aber auch bis zu einem Faktor 1000 reichen). In der Praxis wird die Ursprungsinformation mit einer „Pseudo-noise-Sequenz“ gescrembled. Diese Pseudonoise-Sequenz sieht oberflächlich betrachtet aus wie Rauschen, ist es aber nicht (deshalb „Pseudo“). Es ist eine deterministische und somit reproduzierbare Bitfolge, die einigen speziellen Anforderungen genügt (Noise). Diese Bitfolge wird mit der Nutzinformation verknüpft und stellt die „Duftmarke“ dieser Nutzinformation dar. Außerdem sorgt sie für die notwendige spektrale Aufspreizung des Nutzsignals (das ist das „Spread“ in „Spread-Spectrum“). Technisch wird das realisiert, indem ein Bit der eigentlichen Nutzinformation in ein Bitmuster mit wesentlich höherer Bitrate umgewandelt wird. Der Fachchinese nennt das „Scrambeln“. Per Hardware wird das durch eine EXOR-Verknüpfung der Original-Bits mit der Pseudonoisefolge erreicht.

Da jetzt ein Informationsbit (also unsere in den Luxusschlitten gepackte Information) durch ein Bitmuster mit wesentlich höherer Datenrate repräsentiert wird, ist die Bandbreite des so entstandenen Informationsstroms wesentlich größer, da die Bitrate der „Scramblingsequenz“ deutlich höher liegt. Die Bits dieser Scramblingsequenz werden übrigens als „Chips“ bezeichnet (nein, das hat nichts mit Kartoffelchips zu tun). Die Rate der Chips, also deren Geschwindigkeit, heißt demzufolge (welche Überraschung) „Chiprate“.

Jagt man das Ganze über einen Sender, ergeben sich am Ende der Antenne die folgenden Spektren.



Die blaue Linie (A) zeigt das Spektrum, das man sehen würde, wenn die Originalinformation direkt gesendet würde. Die violette Linie (B) zeigt das Spektrum der gescrambelten Information. Wie man sieht, ist B deutlich breiter als A. Das gesendete Signal wird also auf einen wesentlich breiteren Frequenzbereich aufgespreizt (Spread-Spectrum, da ist's wieder) Wie groß der Unterschied ist, hängt vom Verhältnis zwischen Bit- und Chiprate ab. Die Fläche unter der Umhüllenden repräsentiert übrigens die Sendeleistung und ist in beiden Fällen gleich (für die Profis: Die Spektren entsprechen einer $\sin(x)/x$ -Verteilung und dass ich die Sidelobes unterschlagen habe, weiß ich).

Noch eine kurze Anmerkung: Entgegen einer offenbar weit verbreiteten Ansicht, wird die zusätzliche „Pseudoinformation“ nicht zur Fehlerkorrektur benutzt. Das wäre eine andere Baustelle und nennt sich dann FEC (Forward Error Correction). Es sieht zwar ähnlich aus, ist aber ein anderes Verfahren. Anders ausgedrückt: DSSS an sich kann keine Übertragungsfehler erkennen. Es setzt in der Übertragung früher an und trägt so dazu bei, solche Fehler a priori zu vermeiden.

So weit, so gut. Nun haben wir unsere Information gesendet und damit in die raue Wirklichkeit des Funk-Äthers gescheucht. Nun müssen wir sie nur noch irgendwo und irgendwie wieder ein- bzw empfangen. Und jetzt ist endgültig Schluss mit lustig!

Zunächst mal die Theorie.

Wenn wir dem empfangenen Signal im Empfänger spaßeshalber genau das Gleiche tun, was wir ihm im Sender schon mal angetan haben, passiert etwas höchst Interessantes. Aus dem aufgespreizten Signal entsteht wie von Zauberhand wieder das originale Signal. Die Chips sind verschwunden und unsere heißgeliebte Information ist wieder da. Es wurde schlicht und ergreifend „nur“ wieder eine EXOR-Verknüpfung der Scramblingsequenz mit dem empfangenen Signal durchgeführt.

Der Trick (und das Elend) dabei ist die Empfänger-Scramblingsequenz, die identisch zu der auf der Senderseite sein muss. Das wäre ja noch einfach, wenn man sie nur kennen würde. Dummerweise muss die Sequenz aber zeitlich GENAU(!) synchron zur Scramblingsequenz am Empfangsort sein. Darüber hat man zunächst aber keinerlei Information. Der zeitliche Versatz zwischen Sender- und Empfängersequenz hängt z.B. von der Entfernung und den Ausbreitungsbedingungen ab, über die man naturgemäß nichts weiß. Glücklicherweise gibt es Verfahren und Strategien, die dieses Problem knacken. Die Erklärung, wie das genau funktioniert, erspare ich uns diesmal, sonst würde das hier eine längere Sitzung. Der Witz bei der Sache ist letztlich die genaue Synchronisation zwischen Sender- und Empfängersequenz, die es erlaubt, die Originalinformation wiederherzustellen. Für andere Signale, die diese „Duftmarke“ nicht haben, gilt das nicht. Diese werden wie im Sender spektral aufgespreizt und können recht einfach weggefiltert werden.

Zusammengefasst bedeutet das, durch das „Descrambling“ auf der Empfängerseite wird das „Scrambling“ der Senderseite rückgängig gemacht. Dies trifft allerdings nur dann zu, wenn die „Scramblingsequenz“ inhaltlich und zeitlich genau stimmt. Alle anderen Signale, die diese Signatur der spezifischen Scramblingsequenz nicht haben, können durch geeignete Maßnahmen herausgefiltert werden.

GPS nutzt z.B. dieses Verfahren. Da senden alle Satelliten auf der gleichen Frequenz und können trotzdem ganz hervorragend auseinander gehalten werden. Wenn es gut läuft, sieht der Empfänger schon mal sechs oder mehr Satelliten gleichzeitig und kann sie dennoch alle auseinanderhalten.

So sorgt dieses Verfahren für eine Resistenz gegenüber Störern, die nicht über die richtige „Duftmarke“ verfügen und kann diese eliminieren. Aus dem Signalgemisch im Übertragungskanal kann also das gewünschte Signal aussortiert werden. Bei geeigneter Systemauslegung darf dabei die Feldstärke des Störers übrigens um ein Vielfaches über der des Nutzsignals liegen. Die Fähigkeit, nach diesem Verfahren zwischen Nutz- und Stör-signal zu unterscheiden, ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Chip- und Bitrate und wird als Processing-Gain bezeichnet. Davon ist allerdings der „Implementations-Loss“ abzuziehen, der sich aus der Tatsache ergibt, dass in der Realität weder Sender noch Empfänger ideal sind und sich daher unvermeidliche Performanceverluste ergeben.

Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist seine Fähigkeit, Mehrwegeempfangssituationen „geradebiegen“ zu können. Allerdings hängt die Wirksamkeit dieser Eigenschaft sehr

stark von der absoluten Bandbreite der Aussendung ab. Um das effektiv nutzen zu können, müssen die Chipraten schon recht hoch sein. Typische Vertreter dieser Technologie sind WLAN, GPS, demnächst Galileo und UMTS (das sogar ausgiebig).

Frequency Hopping Spread-Spectrum (FHSS)

Das ist ein völlig anderer Ansatz des Spread-Spektrums.

Der Übertragungskanal überträgt die Information ganz normal und ohne solche Taschenspielertricks wie bei DSSS. Allerdings wechseln Sender und Empfänger ständig die Frequenz und sollten das tunlichst gleichzeitig und nach dem gleichen Schema machen. Es wird also ein Datenpaket (auch Burst genannt) gesendet und dann wechseln Sender und Empfänger die Frequenz. Anschließend wird der nächste Burst gesendet und das ganze System springt (zu neudeutsch „hopt“, daher Hopping) auf die nächste Frequenz. Ist die aktuell benutzte Frequenz anderweitig belegt, ist das Datenpaket wahrscheinlich verloren. FHSS stellt also einen Übertragungskanal bereit, in dem die zu übertragenen Daten nicht durch Kodierung manipuliert werden und der zunächst vergleichbar ist mit einer Übertragung auf einer fixen Frequenz. Sender und Empfänger können dabei einer Standardtechnologie entsprechen, müssen aber die Frequenz ganz flott wechseln können. Ferner muss die Datenübertragung burstorientiert sein, da beim Frequenzwechsel immer kurze Pausen in der Übertragung auftreten, während derer Sender und Empfänger sich nicht hören.

Bezogen auf eine einzelne Frequenz bietet Frequency-Hopping keinen Schutz vor Störungen (für die Insider: hier sind Slow-Hopper gemeint). Daher muss eine übergeordnete Instanz, z.B. das Übertragungsprotokoll, sicherstellen, dass die verlorene Information nach dem nächsten Hop erneut übertragen wird, es sei denn, die Anwendung ist unempfindlich gegenüber dem Verlust einzelner Informationspakete. Dadurch, dass Sender und Empfänger zwar ständig die Frequenz wechseln, aber immer auf der gleichen Frequenz sind, ergibt sich ein Übertragungskanal, der durch Fremdstörer zwar mal kurz gestört werden kann, aber in Summe durch einen Störer auf einer festen Frequenz nicht wesentlich beeinträchtigt wird, solange das Protokoll Wiederholungen verlorener Pakete durchführt oder Verluste einzelner Pakete das System nicht juckt.

Verwendet man bei mehreren gleichzeitig betriebenen Systemen unterschiedliche Hopping-Sequenzen (das ist das Schema, nach dem die Dinger die Frequenz wechseln), kann man viele Systeme gleichzeitig betreiben. Diese arbeiten dann zwar alle im gleichen Frequenzbereich, aber im Normalfall nicht auf der gleichen Frequenz. Dennoch werden sich gelegentlich verschiedene Systeme zur gleichen Zeit auf der gleichen Frequenz treffen und sich dann auch gegenseitig stören, aber wenn die verstümmelte Information wiederholt wird, was soll's?

Zum parallelen Betrieb vieler Systeme auf engem Raum (wie z.B. im Modellbereich) ist diese Technik übrigens deutlich leistungsfähiger als DSSS. Die Gründe dafür sind nicht mit drei Worten erklärt. Glaubt's mir ausnahmsweise einfach mal.

Ein recht beliebtes Beispiel für diese Technologie ist Bluetooth.

Jetzt haben wir die Lösung A und die Lösung B. Beide Möglichkeiten bieten in der Praxis Vor- und Nachteile, die hier ganz kurz angerissen werden sollen.

DSSS Vorteile

Es gibt einen gewissen Störungsschutz durch die Technik der Funkstrecke.

Es gibt Low-Cost-Chips, die diese Funktionalität "on board" haben.

Der Schutz der Funkstrecke erfordert zunächst keine Berücksichtigung im Übertragungsprotokoll.

DSSS Nachteile

Wenn dieser Schutz ein hohes Niveau haben soll, steigt der Aufwand überproportional an. Die Schaltungstechnik wird dann sehr aufwändig. Es ist zwar ein relativ hoher Schutz vor Störern möglich, aber die Zeiten, die benötigt werden, um Sender und Empfänger zu synchronisieren, werden dann extrem lang. Die Verfahren zur schnellen Synchronisation

sind sehr aufwändig und gleiten etwas in den Bereich der „Schwarzen Magie“ ab. Beim Aufeinandertreffen von „starkem Störer“ mit „sehr schwachem Nutzsignal“ versagt das Verfahren relativ kläglich.

Ist also nicht so ganz das Gelbe vom Ei.

FHSS Vorteile

Diese Technik kommt mit dem Fall „starker Störer/schwaches Nutzsignal“ gut zurecht. Die Synchronisationszeiten können bei geschickter Systemauslegung sehr kurz gehalten werden. Die notwendige Hardware ist recht simpel (im Vergleich zu DSSS).

FHSS Nachteile

Der Störungsschutz ergibt sich erst aus dem übergeordneten Übertragungsprotokoll. Ein Störer verlangsamt in jedem Fall die Übertragungsgeschwindigkeit oder die Übertragung ist nicht verlustfrei. Das Verfahren stellt also auch nicht das Äquivalent zu den 6 Richtigen im Lotto dar.

Die Frage ist nun, ob die Vorteile der beiden Verfahren nicht zu kombinieren sind, ohne sich gleichzeitig deren Nachteile einzuhandeln.

Das frohe Botschaft lautet: Es geht tatsächlich!

Stellen wir uns einfach mal vor, wir haben ein DSSS-System, das Frequency-Hopping macht. Damit kommen wir in die komfortable Lage, ein Verfahren zu haben, das die Schwächen des Anderen zumindest in Grenzen ausgleichen kann, ohne dass wir uns mit dessen wesentlichen Unzulänglichkeiten herumschlagen müssen. Damit kommen wir nahtlos zum Thema:

Hybride Systeme

Hybride Systeme verwenden mehrere Spread-Spektrum-Verfahren gleichzeitig. Ich will mich hier auf die Kombination von DSSS mit FHSS beschränken, um das Thema nicht ausufernd zu lassen.

Dazu mal ein kurzer Exkurs: Es gibt bestimmte Unterscheidungsmerkmale, anhand derer sich Informationen auseinander halten lassen.

Wenn es um Funk geht, wären da:

Die Time-Domain

Im alltäglichen Leben gibt es das bei jeder Unterhaltung. Alle reden durcheinander und keiner bekommt was mit. So geht's nicht! Wenn alle einzeln und schön der Reihe nach plappern, erst dann klappt die Verständigung. Umgesetzt auf den Betrieb von Fernsteuerungen bedeutet dies, es darf immer nur einer seinen Sender einschalten (weiß noch jemand, was ein Pendelempfänger ist?).

Die Frequency-Domain

Das Äquivalent dazu wäre: Immer die Zwei, die ungestört miteinander reden wollen, gehen ins Separee. Bezüglich Fernsteuerungen würde das bedeuten, dass jeder eine andere Frequenz nutzt. Das moderne Äquivalent ist FHSS.

Die Code-Domain

Alle reden gleichzeitig im gleichen Raum, aber jeder in einer anderen Sprache. Der geeignete Zuhörer wird den, der in seiner Muttersprache redet, am besten verstehen. In der Nachrichtentechnik würde das dem DSSS entsprechen.

Damit stehen uns Unterscheidungsmerkmale in drei Dimensionen zur Verfügung. Es gäbe noch ein paar mehr, aber da ich davon ausgehe, dass wir alle unsere Probleme mit der Visualisierung und Vorstellung von mehr als drei Dimensionen haben, soll das mal reichen.

Ein Hybrid-System mit DSSS und FHSS nutzt aus diesem Pool der Domains zunächst nur zwei Stück, ist also durchaus noch erweiterungsfähig.

Zieht man alle diese Unterscheidungsmerkmale gleichzeitig heran, steht ein dreidimensionaler Raum zur Verfügung, in dem wir unsere Sender unterbringen können. Damit ein Sender empfangen werden kann, muss er gleichzeitig alle drei Kriterien erfüllen. Ein Störer muss, um stören zu können, ebenfalls diese Kriterien gleichzeitig erfüllen. Das reduziert die Störungswahrscheinlichkeit schon drastisch.

Ein kurzes Beispiel zum Thema Störungswahrscheinlichkeit:

Nehmen wir an, es stünden 100.000 Kanäle zur Verfügung. Das würde zwar nicht ausschließen, dass sich am Platz mal zwei Leute mit der gleichen Frequenz treffen, aber rein statistisch gesehen dürfte das recht selten vorkommen.

Wenn dieser dreidimensionale Raum zur Unterscheidung der einzelnen Sender nicht voll ausgenutzt wird, bleibt noch genügend Raum für Störungen, die dann dort auch ihren Platz finden, ohne Schaden anzurichten (siehe oben unter dem Thema „Kanalerschöpfung“). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Störer alle drei notwendigen Kriterien gleichzeitig erfüllt, ist recht gering.

So, und jetzt kommt der zusätzliche Gimmick:

Der betrifft das allseits beliebte Thema „Funklöcher“.

Damit hat wohl schon mal der Eine oder Andere schmerzliche Bekanntschaft machen müssen. Es gibt auf vielen Modellfluggeländen Bereiche, an denen die Anlage regelmäßig nicht funktioniert und wo früher oder später jeder mal 'runterfällt. Dieser Effekt, um den sich wilde Gerüchte und unendliche Sagen ranken, existiert tatsächlich und nennt sich im Fachchinesisch „Mehrwegeempfang“ oder „Multipath“. Erklärbar ist das durch die Auslöschung des Sendersignals am Empfangsort durch die Ausbreitung des Signals über verschiedene Ausbreitungswege. Es gibt mehrere Mechanismen, die zur Auslöschung oder Zerstörung des Sendersignals am Ort des Empfängers führen können.

Die Lage dieser „Problemzonen“ ist frequenzabhängig. Das bedeutet, dass es für die Rettung des Fliegers hilfreich sein kann, im Augenblick des „Funklochs“ und des „Kontrollverlusts“ mal ganz hurtig die Frequenz zu wechseln. Mit einer anderen Frequenz verschiebt sich das „Funkloch“ dann beispielsweise in die gegenüberliegende Ecke des Platzes. Ist jedoch der Ort des „Funklochs“ und der momentane Aufenthaltsort des Fliegers verschieden, juckt es uns nicht mehr so sehr. Allerdings muss der Frequenzsprung groß genug sein, um eine wesentliche Ortsveränderung des „Funklochs“ zu bewirken.

Das FHSS liefert nun genau diese Funktion. Es ist natürlich, wie oben schon erwähnt, vorstellbar, dass Frequenz und Ausbreitungsbedingungen exakt passen, um an der augenblicklichen Position des Fliegers ein Loch zu erzeugen. Aber da dieses System permanent die Frequenz wechselt, ändert sich auch die Position des „Funklochs“ ständig. Wenn das Verfahren schnell genug abläuft, merkt man nicht mal, dass da ein Problem war. Bluetooth macht diesen Frequenzwechsel z.B. ca. 1600 mal in der Sekunde und hat daher auch wenig Probleme mit diesem unerfreulichen Effekt.

DSSS hat in der Theorie eine ähnliche Funktionalität, die in der Praxis jedoch nur begrenzt nutzbar ist, da die Betriebsparameter für eine Implementation mit effektivem Schutz gegen Multipath-Empfang (eben diese „Funklöcher“) den Hardwareaufwand sehr in die Höhe treiben. Allerdings kann man auch einen limitierten Gewinn in diesem Bereich durch DSSS in Verbindung mit FHSS bei einem hybriden System kaltlächelnd mitnehmen.

Was haben wir nun davon?

Mit den beschriebenen Möglichkeiten stehen uns nun wesentlich mehr Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Sendern und potentiellen Störern zur Verfügung. Bisher gab es nur ein Unterscheidungskriterium in einer Dimension (der Frequenz). Jetzt ist es dreidimensional. Man könnte sich vorstellen, dass es im würfelförmigen Raum der genutzten Domains (Time, Frequency und Codedomain) viele kleine Würfel gibt, die unseren Übertragungskanal repräsentieren. Der Übertragungskanal wird also durch drei räumliche Koordinaten (Frequenz, Code und Zeit) bestimmt, die alle drei gleichzeitig stimmen müssen, um Daten übertragen oder stören zu können. Stimmt eine Koordinate nicht, gibt's keine Datenübertragung aber auch keine Störungen. Die Wahrscheinlichkeit, einem Störer zum Opfer zu fallen, sinkt damit drastisch. Dieses Feature nennt sich im Fachchinesisch „Jamming-Resistance“ und ist bei der hier dargestellten Kombination als hoch einzuschätzen. Selbst ein mutwilliger Störer hat dabei nur mit gigantischem Aufwand eine Chance auf Erfolg. Das Thema „Funkloch“ wird quasi am Rande mit erschla-

gen, da eine geschickte Implementation eines solchen Hybrid-Systems dagegen automatisch deutlich resistenter ist als die konventionelle Technik.

Die Kehrseite der Medaille

Über Eines muss man sich aber vollkommen im Klaren sein:

Innerhalb der z.Z. benutzten Frequenzbereiche kann man alles das hier Beschriebene schlicht und einfach vergessen. Es geht aus technischen und regulatorischen Gründen nicht. Diese Verfahren erfordern alle sehr viel mehr Bandbreite, als sie die klassischen R/C-Frequenzbereiche bieten. Das jetzige Schema der Frequenzpläne für Fernsteuerfrequenzen hat ja nun auch schon ein paar Jahre auf dem Buckel und stammt aus Zeiten, in denen die Anwendung von Spread-Spectrum-Techniken im R/C-Bereich einfach vollkommen illusorisch war.

Um die Vorteile dieser Verfahren nutzen zu können, wird man sich in Richtung deutlich höherer Frequenzen orientieren müssen, um die notwendigen Bandbreiten zur Verfügung zu haben und in denen die regulatorischen Voraussetzungen für die Anwendung solcher Techniken heute gegeben ist. Für diese Frequenzbereiche stehen hochintegrierte Lösungen zur Verfügung, die auf den Massenmarkt der Short-Range-Devices auf 868MHz und 2,4GHz zielen. Diese Lösungen sind für wenig Geld verfügbar. Die wenigen und nicht sehr komplexen Chips, die es für die traditionellen Bereiche 27/35/40MHz noch gibt, treten, nebenbei bemerkt, alle so langsam den Weg in Richtung Friedhof an.

Das bedeutet in letzter Konsequenz, dass wir früher oder später unsere bisherige Funktechnik in dem Mülleimer kippen können und etwas völlig Neues brauchen.

Die Hardwarekomponenten dafür stehen heute schon als Massenprodukte zur Verfügung. Ebenso gibt es Frequenzbereiche, in denen aktuelle Technologien genutzt werden können. Allerdings, und das muss man auch ganz klar sehen, geht bei einem Wechsel des Frequenzbereichs z.B. das lauschige Eckchen hinter dem warmen Ofen der exklusiven Frequenzuteilung (wie z.B. 35MHz) verloren. Ein neues lauschiges Plätzchen in Form einer neuen und de facto exklusiven Frequenzzuweisung zu finden, dürfte ein eher langfristiges Ziel sein. Dahingehend müsste ein erhebliches Maß an Lobby-Arbeit seitens der Industrie geleistet werden. Neue Implementationen für R/C-Anlagen erfordern in den angepeilten Frequenzbereichen einen sehr tiefen Griff in die Trickkiste der Nachrichtentechnik, um auch unter der Konkurrenzsituation mit anderen Funkanwendungen eine möglichst sichere Übertragung zu gewährleisten. Damit spielt ein solches neues System vom technologischen Anspruch her in einer gänzlich anderen Liga, verglichen mit dem, was zur Zeit über den Ladentisch geht.

Um das alles mal zusammenzufassen (oder wie es Neuhochdeutsch neuerdings so schön heißt): Executive Summary

Es existieren technische Ansätze und Konzepte, die mit vertretbarem Aufwand die Implementation von R/C-Anlagen ermöglichen, die gegenüber Störungen und Fehlbedienungen wesentlich besser geschützt sind, als die jetzigen Anlagen. Diese Ansätze beinhalten Features wie z.B. einen Rückkanal für Telemetrie und Warnung des Benutzers bei funktechnisch kritischen Situationen sowie die automatische Organisation der Funkstrecke. Allerdings sind diese Techniken in den traditionellen Frequenzbereichen nicht realisierbar, sondern erfordern die Nutzung anderer Frequenzbänder, die aber leider schon von anderen Anwendern belegt sind. Eine Technologie, die dort, im R/C-Bereich mit seinen erhöhten Sicherheitsanforderungen an die Funkstrecke, bestehen will, muss also weitgehend resistent gegen Störung durch andere Anwendungen sein und gleichzeitig mit diesen koexistieren können. Daher ist eine auf die besonderen Anforderungen der Anwendung „Fernsteuerung“ maßgeschneiderte Technologie notwendig. Eine einfache Adaption bereits vorhandener Applikationen (z.B. Bluetooth, WLAN, DECT, Wireless-USB o.Ä.) greift aus diesem Grund daher viel zu kurz, da diese der Summe der Anforderungen der Applikation R/C alle nicht genügen. Um die Gesamtheit dieser Anforderungen (soweit überhaupt möglich) zu erfüllen, müssen sämtliche Register des technisch Machbaren gezogen werden.

Es gibt also viel zu tun. Fangen wir mal an...

Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie aus <<http://de.wikipedia.org/wiki/FHSS>

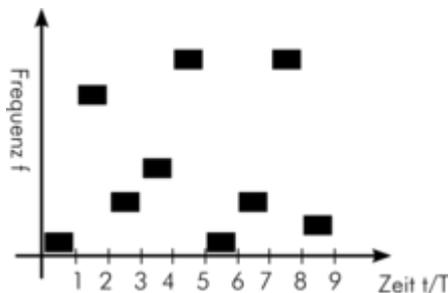


Diagramm Frequenzsprungverfahren

Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) ist ein [Frequenzspreizverfahren](#) für die [drahtlose Datenübertragung](#). Es wird unterteilt in Fast- und Slow Hopping.

Generell wechselt hier die [Trägerfrequenz](#) frequentiv und diskret. Die Sequenz der Frequenzwechsel wird durch [Pseudozufallszahlen](#) bestimmt (siehe Bild).

Die Nutzdaten werden erst schmalbandig moduliert, und dann in einem zweiten Modulator durch einen Frequenz-Synthesizer gespreizt. Auf der Gegenseite wird an den Empfangsmodulator wieder ein Frequenz-Synthesizer angeschlossen, der die Spreizung rückgängig macht und dann konventionell demoduliert.

Diese Technik wird zivil beispielsweise bei [Bluetooth](#) und im Ur-WLAN Standard [802.11](#) und optional in speziellen Betriebsmodi im Rahmen von [GSM](#) verwendet. Beim Militär heißen sie [SINCGARS](#).

Inhaltsverzeichnis

- [1 Bandbreite und Störanfälligkeit](#)
- [2 Slow Hopping](#)
- [3 Fast Hopping](#)

Bandbreite und Störanfälligkeit

Der Unterschied des [Spektrums](#) im Vergleich zu [DSSS](#) äußert sich darin, dass das Spektrum des modulierten Signals genauso breit ist wie das Ursprungssignal selbst. Die spektrale Spreizung erfolgt praktisch nur auf zeitlicher Basis, da die Trägerfrequenz immer nur für einen kleinen Moment konstant bleibt.

Ähnlich wie bei DSSS lassen sich auch FH-SS Nachrichten vor "Mithörern" verstecken. Anders als beim DSSS wird das Signal aber nicht im Rauschen versteckt, sondern es lässt sich deswegen nicht abhören, weil ein Außenstehender nie weiß auf welcher Trägerfrequenz sich nach dem nächsten *Hop* das Signal befindet. Weiterhin kann auch noch die Hopdauer T_h variiert werden (slow FH (= SFH) bzw. fast FH (= FFH)).

FHSS zeichnet sich auch besonders durch die geringe Störanfälligkeit aus. Das liegt daran, dass immer nur für eine kurze Dauer die gleiche Trägerfrequenz verwendet wird. Ist beispielsweise die Frequenz f_{t1} durch einen anderen Sender gestört, so wird nur ein kleiner Teil der Datenfolge dieser Störung unterliegen, welche sich meist durch entsprechende [Fehlerkorrekturverfahren](#) korrigieren bzw. erkennen lassen.

Slow Hopping

Hierbei wird minimal 1 bit pro Frequenzsprung übertragen, also z. B. 3 Bits, bevor die Frequenz wechselt.

Fast Hopping

Hier wird maximal 1 bit pro Frequenzsprung übertragen, es können aber durchaus auch 3 Frequenzsprünge innerhalb eines Bits stattfinden.

FHSS ist leicht implementierbar, nutzt aber nur einen schmalen Bereich des Spektrums zu einem Zeitpunkt, und ist nicht so abhörsicher wie [DSSS](#).

Technische Modulationsverfahren

Übersicht: [Modulator](#)

Analoge Modulationsverfahren: [AM](#) | [FM](#) | [PM](#) | [VM](#) | [SSB](#) | [SSBSC](#) | [DSBSC](#)

Digitale Modulationsverfahren: [ASK](#) | [FSK](#) | [GFSK](#) | [QPSK](#) | [QAM](#) | [OFDM](#) | [DMT](#) | [TCM](#) | [VSB](#)

Pulsmodulationsverfahren: [PWM](#) | [PAM](#) | [PFM](#) | [PPM \(1\)](#) | [PPM \(2\)](#) | [PCM](#)

Frequenzspreizende Modulationsverfahren: [FHSS](#) | [DSSS](#) | [THSS](#) | [CSS](#) | [IDMA](#)

Von „http://de.wikipedia.org/wiki/Frequency_Hopping_Spread_Spectrum“

FHSS

aus <http://modellfluginfo.de/Modellflugzeug/wiki/fhss.php>

FHSS ist die Abkürzung für Frequency Hopping Spread Spectrum. Das bedeutet einfach gesagt, dass das 2,4 GHz System ständig die Frequenz wechselt. Sender und Empfänger sprechen sich dabei ab, so dass beide immer für eine kurze Zeit auf der gleichen Frequenz senden und empfangen. Damit Sender und Empfänger immer gleich wechseln, muss der Empfänger an den Sender gebunden werden. Bei FHSS wird also nicht nur beim Einschalten nach einem freien Kanal gesucht, auf dem gesendet werden kann, sondern dauernd gewechselt.

Durch das FHSS Verfahren können so viele Fernsteuerungen gleichzeitig genutzt werden, ohne dass man sich wegen gegenseitigen Beeinflussungen Sorgen machen müsste. Die Zeit, die sich ein FHSS System auf einem Kanal befindet beträgt meist nur wenige Millisekunden, bevor es dann zum nächsten Kanal wechselt. Je nach System, wechseln die 2,4 GHz Systeme auf unterschiedliche vielen Kanälen hin und her.

Bekannte 2,4 GHz Systeme, die FHSS nutzen sind unter anderem:

- Jeti Duplex FHSS
- Graupner Hott FHSS
- Multipex M-Link FHSS
- Weatronic FHSS
- Acteuropa S3D FHSS
- Futaba Fasst FHSS/DSSS
- FrSky - FHSS

Reichweite einer 2,4 GHz Fernsteuerung

aus <<http://modellfluginfo.de/Modellflugzeug/wiki/reichweite-2-4-ghz-fernsteuerung.php>

Jeder Modellflieger wird sich irgendwann mal die Frage nach der Reichweite seiner RC-Anlage stellen. Gerade die Reichweite stellt für viele ein Wert dar, über die sich die sichere Steuerung einfach definieren lässt. Leider ist es nicht ganz so einfach, da zum sicheren Betrieb eine ausreichende Reichweite zwar notwendig, aber bei Weitem nicht hinreichend ist.

Grundsätzlich sei vorweg gesagt: Jeder namhafte Hersteller bietet inzwischen 2,4 GHz Systeme mit ausreichender Reichweite an. So gesehen könnten Sie hier bereits beruhigt aufhören zu lesen. Da es allerdings neben der reinen Reichweite auch noch weitere Faktoren zur sicheren Steuerung eines Modellflugzeugs gibt, lohnt es sich doch, sich etwas mit diesem Thema zu beschäftigen, um zu sehen, wie man die Reichweite steigern kann.

Die theoretische Reichweite bei 2,4 GHz Anlagen

Schauen wir uns mal die theoretische Reichweite an, wie sie die Hersteller gerne angeben. Dieser Wert ist unter Laborbedingungen ermittelt und sollte Sie keinesfalls blenden. Man spricht hier von 2, 3 oder noch mehr Kilometern, die bei Sichtkontakt erreicht werden. Oft liest man auch, dass diese Werte am Boden erreicht werden und Sie deshalb mit deutlich höheren Werten in der Luft rechnen können.

Die praktische Reichweite bei 2,4 GHz Steuerungen

Während die theoretische Reichweite nichts anderes als eine Angabe für das Verkaufsprospekt bedeutet, ist die praktische Reichweite für alle Modellflug Piloten von Bedeutung. Hier spielen alle Störfaktoren mit ein und das können bei Modellflugzeugen einige sein. Die wichtigsten Störgrößen sind:

- Sich schnell ändernde Ausrichtung der Sende- und vor allem der Empfangsantennen
- Abschirmung durch Flugzeugteile wie Rumpf oder Flächen, je nach Fluglage
- Beeinflussung durch RC-Komponenten wie z.B. Flugregler, Motoren oder Telemetriesysteme bzw. Kameras
- Mehrere gleichzeitig sendende 2,4 GHz Systeme
- Schwankende bzw. zu schwache Spannungsversorgung
- Verzögerte Wiederaufnahme des Empfangs bei Störung

All diese Faktoren können aus einem theoretisch > 2000 Meter 2,4 GHz System schnell ein praktisch < 1000 Meter 2,4 GHz System machen.

Reichweite von 2,4 GHz Systemen steigern

Wenn Sie also auf das System vom Hersteller XY gesetzt haben und nun zur Sicherheit die maximale Reichweite benötigen, haben Sie verschiedene Möglichkeiten.

Mehr praktische Reichweite durch mehrere Empfänger im Parallelbetrieb

Während noch bei 35 MHz die Diversity-Systeme die Ausnahme darstellten und den Luxusfliegern vorbehalten waren, ist dies nun gerade umgekehrt. Mit einer Antenne fliegt man heute nur noch Schaumwaffeln. Die Mehrkosten einer zweiten Empfängerantenne sind so gering, dass Sie die 20 EUR mehr auf jeden Fall investieren sollten, wenn damit zu rechnen ist, dass das Modell über 300 Meter wegfiegt. Innerhalb dieses Bereichs ist es dann völlig ausreichend auch mit einer Antenne zu fliegen, wenn es sich um ein ungefährliches Modell handelt.

Diversity kann in verschiedenen Ausprägungen umgesetzt werden:

- Ein Empfänger mit mehreren eingebauten Empfangsteilen und Antennen
- Ein Hauptempfänger und mehrere Satellitenempfänger
- Mehrere parallel arbeitende Empfänger mit jeweils mehreren Empfangseinheiten

Das Prinzip ist jedes Mal grundsätzlich gleich. Es werden immer nur die besten Signale durchgelassen. Wenn also gerade im Grenzbereich vermehrt kurze Störungen auftreten kann der Empfang bei einem gut ausgelegten Empfangssystem durchaus gesichert sein.

Das ganze kann man natürlich ziemlich weit spinnen, wer hohe Sicherheit will, sollte auf Diversity allerdings nicht verzichten.

Auslegung und Ausrichtung der Antennen

Es ist leicht nachvollziehbar, dass die genutzten Antennen, ob nun 2, 4 oder mehr, nicht alle gleich ausgerichtet werden sollten, da sich das Modell ständig in Bewegung befindet und kurze Aussetzer der einen Antenne, durch eben eine abweichende Ausrichtung der anderen Antenne kompensiert werden sollen.

Grundsätzlich gilt, die Antennen aus dem Rumpf heraus zu legen. Die kurzen Stummel können an allen Modellen problemlos verlegt werden. Für Aerodynamik-Fetischisten bietet sich dann immer noch an, diese außerhalb des Rumpfes nicht frei schwingen zu lassen, sondern mit Klebeband auf den Rumpf zu kleben.

Wie viel Reichweite benötigt man für ein Modellflugzeug?

Die notwendige Reichweite der Fernsteuerung hängt sehr stark vom Flugmodell selbst ab. Ein kleines gutmütiges Hobbymodell mit ca. 1 Meter Spannweite oder ein Modell zum auf dem Platz rumturnen kann im Radius von < 200 Meter dauerhaft geflogen werden. In diesem Fall ist das Thema Reichweite praktisch irrelevant.

Große Modelle ermöglichen es auf Sicht weiter weg zu fliegen und erfordern so auch eine deutlich höhere Reichweite. Während man mit 1 Meter Flugzeugen spätestens bei 400 Meter umdrehen sollte, falls man nicht mit Adleraugen gesegnet ist, sind größere Flieger auch noch bei 1000 Meter Entfernung steuerbar. Grundsätzlich sollte man immer die doppelte sichere praktische Reichweite zur Verfügung haben, um völlig sorgenfrei fliegen zu können.

Bei einem hochwertigen Modell sind deshalb eine Fernsteuerungssystem mit einer praktischen Reichweite von mindestens 1500 Meter absolut unverzichtbar.

Reichweitentest 2,4 GHz (nicht wissenschaftlich)

aus <http://www.rc-heli.de/board/archive/index.php/t-148531.html>

Hallo,

da heute Abend das Wetter wieder einmal viel zu schlecht zum Fliegen war, habe ich versucht meinen bisherigen angelesenen Wissensstand zum Thema 2,4 Ghz empirisch zu überprüfen. Bitte nicht ganz so bierernst nehmen, obwohl ich schon ein wenig überrascht war.

Mein Kenntnisstand:

1. 2,4 Ghz Sender und Empfänger brauchen Sichtkontakt
2. Die Antennen dürfen nicht durch leitfähige Materialien (z.B. CFK oder Metall) abgeschirmt sein
3. Diversity ist ein Muss
4. Regel 1, 2 oder 3 verletzt und nichts geht mehr.

Versuchsaufbau:

Mein T-Rex 450 mit Futaba R6008HS Empfänger steht im Keller (Hobbyraum) eines Einfamilienhauses. Sender ist mit Futaba TM-8 bestückt.

Erster Versuch: Beide Antennen durch ein Metallröhrchen komplett abgedeckt (siehe Bild). Range Taste am Modul zur Sendeleistungsreduktion gedrückt. Erwartet hätte ich wegen Regel 1, dass der Empfänger die Arbeit komplett einstellt. Hat er aber nicht. Wechsel in einen anderen Raum im Keller (Regel 1) beeindruckte den Empfänger ebenfalls nicht. Selbst ein Wechsel ins Erdgeschoß brachte den Empfänger nicht dazu die Arbeit einzustellen. Erst auf halbem Weg ins 1.OG verweigerte der R6008HS. Fazit: beide Antennen komplett mit Metall abgeschirmt, kein Sichtkontakt, 1,5 Stockwerke Mauerwerk zwischen Sender und Empfänger, Sendeleistung reduziert und es kommt immer noch etwas an. An der Funktionsgrenze die Range Taste losgelassen und sofort wieder Funktion da.

Zweiter Versuch: Das ganze mit Kohlefaserröhrchen. Ergebnis gleich erstem Versuch.

Dritter Versuch: Eine Antenne mit Metallröhrchen abgedeckt, zweite Antenne frei (Regel 3). Jetzt geht es bis zur Hälfte in den zweiten Stock. Also etwas besser, diesmal 2 Stockwerke. An der Funktionsgrenze die Range Taste losgelassen und sofort wieder Funktion da.

Vierter Versuch: Antennen gewechselt. Erwartungsgemäß das gleiche Ergebnis wie im dritten Versuch.

Fünfter Versuch: Beide Antennen frei. Geht noch marginal weiter. 2,5 Stockwerke. An der Funktionsgrenze die Range Taste losgelassen und sofort wieder Funktion da.

Fazit: Ich glaube das FASST 2,4 GHz ist sehr robust. Abschattungen und Sichtkontakt sind sicher in Grenzsituationen zu vermeiden. Diese Grenzsituationen dürften aber um Größenordnungen außerhalb des Betriebsbereiches von Hubschraubern sein. Ein Empfänger ohne Diversity (z.B. R6107SP) dürfte nur unwesentlich schlechter sein, wenn man Regel 1 und 2 nicht missachtet.

Kollisionswahrscheinlichkeit bei 2,4 GHz R/C-Systemen



Frank Tofahrn

aus <http://www.rc-network.de/magazin/artikel_09/art_09-027/art_027-01.html

Stand: 14.05.2009

Teil 1: Spezialfall Hesselberg

2,4 GHz R/C-Systeme arbeiten in einem Frequenzband, in dem man schon mal dann und wann mit anderen Systemen konfrontiert werden kann. In diesem Frequenzband ist man jetzt nicht gerade allein auf weiter Flur. Auf dem Modellfluggelände sind auch andere 2,4 GHz R/C-Anlagen in Betrieb. Die bisherige Erfahrung zeigt jedoch, dass ein Mischbetrieb von Anlagen unterschiedlicher Hersteller recht problemlos funktioniert.

Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit auch recht hoch, mit Systemen konfrontiert zu werden, die aus anderen Anwendungsbereichen stammen. Die möglichen Konkurrenzsysteme sind zahlreich, grenzen sich aber in der Realität auf einige wenige Anwendungen ein. Abgesehen von anderen R/C-Systemen, was der häufigste Fall sein dürfte und Gegenstand einer separaten Betrachtung sein wird, gibt es da die Menschen mit dem Knopf im Ohr. Gemeint sind Bluetooth-Headsets. Ob man jetzt unbedingt während des Flugbetriebs telefonieren muss oder über das Handy Radio hören will, sei mal dahingestellt. Die aktuellen Bluetooth-Systeme kollidieren mit R/C-Anlagen allerdings nur in geringem Umfang. Die Betriebsparameter der R/C-Anlagen und der Bluetooth-Systeme stellen das sicher.

Ein weiterer Konkurrent sind WLAN-Systeme., die sich aber gegenüber R/C-Anlagen kooperativ verhalten und daher wenig Probleme bereiten. Diese Anwendungen sind, genauso wie R/C-Anlagen, auf 100 mW EIRP (Strahlungsleistung) beschränkt. Ein hypothetisches Störpotential ist nur dann gegeben, wenn der Störer näher am Modell ist als der eigene Sender und selbst dann ist die Störwahrscheinlichkeit sehr, sehr gering.

Anders sieht das bei Aussendungen von anderen Funkdiensten in diesem Frequenzbereich aus, die deutliche höhere Strahlungsleistungen nutzen dürfen. In letzter Zeit wird das Thema Amateurfunk, insbesondere die Situation des Fluggebiets Hesselberg, heiß diskutiert. Die Situation dort soll hier näher beleuchtet werden.

Am Hesselberg befindet sich ein Modellfluggebiet und ein Amateurfunkrelais, das auf mehreren Frequenzen sendet, in enger Nachbarschaft. Dies ist die Folge der von beiden Nutzern bevorzugten Lage oben auf dem Berg, da sowohl die Funkamateure als auch die Hangflieger eine Vorliebe für größere Höhen haben. Leider führt das zu der ungewöhnlichen Situation, dass eine der Ausgaben des Hesselberg-Relais sich in der Frequenz mit dem Frequenzbereich des 2,4 GHz-Modellfunks überschneidet. Der Bereich, der durch R/C-Anlagen genutzt werden kann, geht von 2400 – 2483.5 MHz. Im gleichen Frequenzbereich ist ein Amateurfunkband von 2320 – 2450 MHz angesiedelt.

Angesichts dieser Konstellation machen wir als Modellflieger zunächst mal ein dummes Gesicht. So ein Elend. Da funken doch tatsächlich noch andere Gestalten 'rum und die dürfen sogar richtig Power machen. Die regulative Lage ist die, dass ein Amateurfunkrelais als automatisch betriebene Funkstelle 15 W ERP (Equivalent Radiated Power) machen darf. Das entspricht einer EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) von ca. 24 W. Das hört sich, legt man die Maßstäbe des Modellfunks mit ihrem Limit von 100 mW EIRP zunächst mal an, als ob es gigantisch viel Leistung wäre, mit der da gearbeitet würde. Bei Licht betrachtet ist das aber nicht der Fall. Es ist eher so, dass 24 W EIRP ziemlich wenig und 100 mW ganz wenig Leistung sind. Der Unterschied in den Leistungen ergibt sich aus den Anforderungen an die Reichweite, bei der man im Modellfunk mit 1 – 2 km gut bedient ist. Im Amateurfunk sind dagegen Reichweiten im Bereich >100 km gefragt (bei entsprechenden Standorten).

Die Frage ist jetzt: "Beeinträchtigt uns das als Modellflieger eigentlich?"

Dazu muss zunächst untersucht werden, ob ein solches Amateurfunksystem den Betrieb von 2,4 GHz-Anlagen stören und damit dem Flieger schaden kann. Um die Antwort vor-

weg zu nehmen: Sie lautet JEIN!

Um dieser Problematik näher zu kommen, habe ich einige Simulationen der Konkurrenzsituation *Relaisausgabe vs. Modellfernsteuerung* durchgeführt.

Zunächst die Randbedingungen für die Simulation:

Seitens des Amateurfunkrelais:

Belegte Bandbreite: 16 MHz

Modulationsart: OFDM

Spectrumshape: Sog. Brickstone-Spectrum, d. h. die spektrale Leistungsdichte in den belegten 16 MHz ist überall weitgehend gleich. Damit ergibt sich eine spektrale Leistungsdichte von 1,5 W EIRP/MHz.

Betriebszeit: Relais kann jederzeit auf Sendung gehen, ohne vorher zu prüfen, ob der Frequenzbereich frei ist. Diese Möglichkeit ist weder für das Relais selbst noch für den Nutzer des Relais gegeben. Das kann auch nach dem Verbindungsaufbau der R/C-Anlage geschehen, also im Flug.

Sendedauer: Dauersender mit 100 % Duty-Cycle während des Sendebetriebs. Wenn der Sender aktiv ist, wird zumindest für mehrere Minuten ununterbrochen gesendet.

Diese Betriebsparameter sind für Relaisfunkstellen (nicht nur im Amateurfunk) typisch und üblich.

Seitens der Modellfernsteuerungen:

Fall 1:

„Echte“ Frequencyhopper, die das gesamte Band mit ausreichend vielen Frequenzen (hier 15 oder mehr) nutzen. Dazu wird hier exemplarisch das FASST-System betrachtet.

Fall 2:

Systeme, die abwechselnd zwei Frequenzen nutzen.

Dazu wird hier beispielhaft das Spektrum DSM2-System betrachtet.

In beiden Fällen werden eventuelle Vorteile durch die Anwendung von DSSS- oder FEC-Verfahren nicht in Betracht gezogen. Die Systemgewinne bei R/C-Anlagen sind für beide Verfahren relativ gering und werden daher nicht mit einbezogen. Da R/C-Sender und Relais im speziellen Fall Hesselberg üblicherweise ähnliche Abstände zum Modell haben, wird das von der Strahlungsleistung her deutlich stärkere Relais im Normalfall immer „gewinnen“. Die realisierbaren Systemgewinne werden kaum ausreichen, um den Unterschied in der Strahlungsleistung sicher zu kompensieren. Wäre das Relais ein paar Kilometer weit weg, sähe die Situation schon ganz anders aus.

Die R/C-Systeme spielen in dieser Betrachtung die Rolle des Victims (Opfers) und das Amateurfunkrelais die Rolle des Interferers (Störers). Man kann die Betrachtung natürlich mit vertauschten Rollen anstellen. Das gäbe allerdings nicht den Standpunkt der Modellflieger wieder.

Ferner wird davon ausgegangen, dass der Interferer erst dann aktiv wird, wenn das Modell bereits fliegt. Die Suche nach freien Frequenzen beim Einschalten der Fernsteuerung wird somit also nicht in Betracht gezogen. In diesem speziellen Fall ist die Situation, dass das Relais erst auf Sendung geht, wenn der Flieger in der Luft ist, sehr real und wird daher genauso betrachtet.

Die Untersuchung geht weiterhin davon aus, dass die Aussendung des Relais aufgrund der im Vergleich zur R/C-Anlage wesentliche höheren Strahlungsleistung in jedem Fall eine erfolgreiche Übertragung der Daten vom R/C-Sender zum Modell vollständig stört. Das muss in der Realität nicht so sein, wird hier aber als Worst-Case-Szenario angenommen. Wir wollen ja schließlich wissen, was schlimmstenfalls passieren kann und nicht, was eventuell so gerade eben noch gut geht.

Die Simulation wird in einem Frequenzraster von 1 MHz (ich weiß, für FASST passt das nicht ganz, es hat aber auf das Ergebnis kaum Einfluss) und einem Zeitraster von 100µs durchgeführt. Die Simulationszeit beträgt fünf Sekunden. Länger ging's nicht. Die 2 GByte RAM des Rechners reichen nicht für längere Zeiten.

Die Simulation zeigt die Kollisionsmöglichkeiten zwischen den verschiedenen Systemen. Dort KÖNNTE eine Kollision stattfinden, die eine Datenübertragung des Victim-Systems unterbindet, sie muss aber nicht stattfinden.

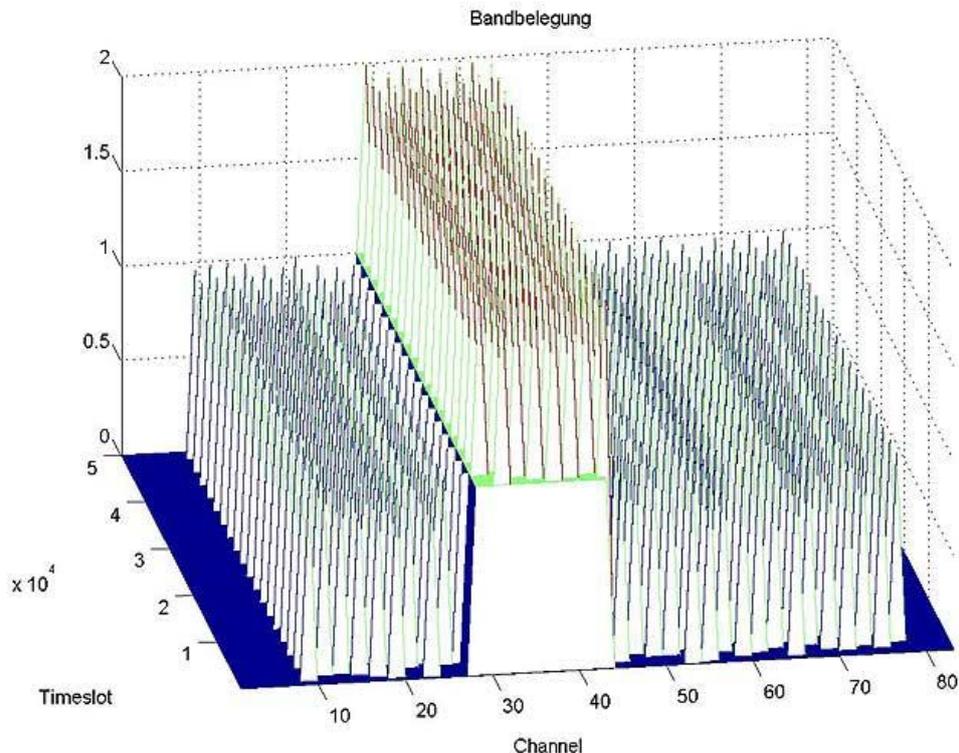
Ich betone nochmals: *Das ist eine Worst-Case-Betrachtung, d. h. viel schlimmer kann es nicht kommen.*

Fall1:

Victim: FASST

Interferer: Amateurfunkrelais:

Dazu kann man ein nettes Bild produzieren:



Was will uns diese geile Grafik sagen?

Das Bild stellt einerseits die Sendungen von einem System dar, das weitgehend FASST entspricht und das andererseits das Relais mit seiner Sendung über Zeit und Frequenz darstellt. Die Achse „Channel“ bezeichnet den „Kanal“ der Aussendung. Die tatsächliche Frequenz ergibt sich durch die Addition des Wertes „2400“. Das ist die Frequenz in MHz. Die Achse „Timeslot“ ist einfach die Zeit in 100 µs-Schritten. Das gilt auch für die folgenden Plots.

Der große weiße „Klotz“, ungefähr in der Mitte des Diagramms, stellt die Aussendung des Relais dar. Die vielen Peaks sind die Aussendungen von FASST.

Die Peaks in der 2. Etage des Plots über dem „Klotz“ der Relaisaussendung sind potentielle Kollisionen. In Zahlen ausgedrückt sind das ungefähr 20% der gesendeten Datenpakete, die potentiell gestört sind.

Die große Frage ist nun, in wieweit beeinträchtigt das den geeigneten FHSS-User?

Die überraschende Antwort ist einfach: Überhaupt nicht!

Eine Verlustrate von 20% macht bei einem FHSS-System praktisch nichts aus. Da hier als exemplarisches System FASST benutzt wurde, ist noch anzumerken, das FASST aller Wahrscheinlichkeit nach redundante Infos sendet. Vermutlich zwei Datenpakete pro PPM-Frame, so dass sich die Verlustrate im statistischen Mittel auf 10 % reduziert. Und das dürfte selbst dem superschnellsten Knüppelrührer kaum auffallen. Den Interfererblock kann man übrigens in der Frequenz beliebig hin und herschieben; es ändert nichts am Ergebnis.

Das Fazit ist, dass es wohl kaum zu Störungen kommen dürfte. Es könnte zu einer Erhöhung der Latenzzeit der Steuerung kommen. Ob diese aber auffällt, ist allerdings fraglich.

In dieser Simulation wurde FASST als Beispiel benutzt. Die Betrachtung gilt prinzipiell aber genauso für alle anderen „echten“ Frequencyhopper (ACT, IFS3, Jamara Jump ,

Multiplex, Weatronic usw.). Um jedoch nicht den Rahmen des Beitrags zu sprengen, wurde die Betrachtung auf ein marktübliches System beschränkt.

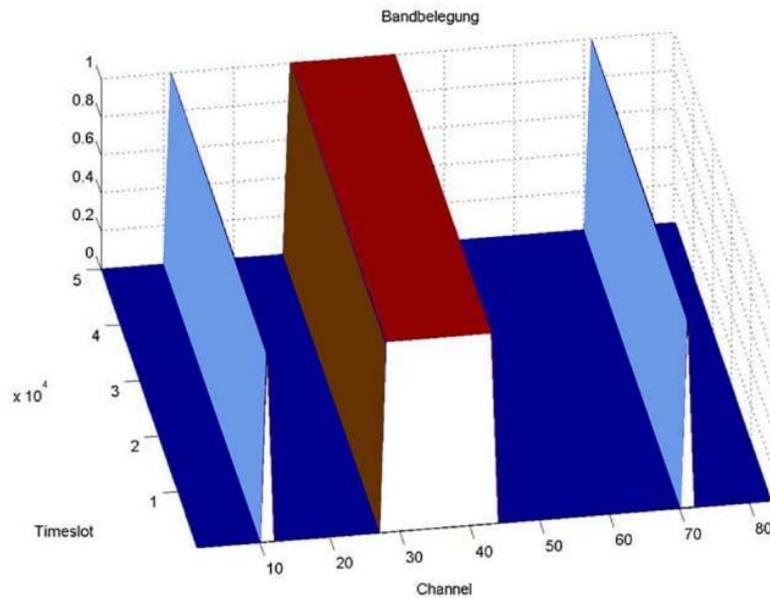
Fall2:

Victim: Spektrum DSM2

Interferer: Amateurfunkrelais:

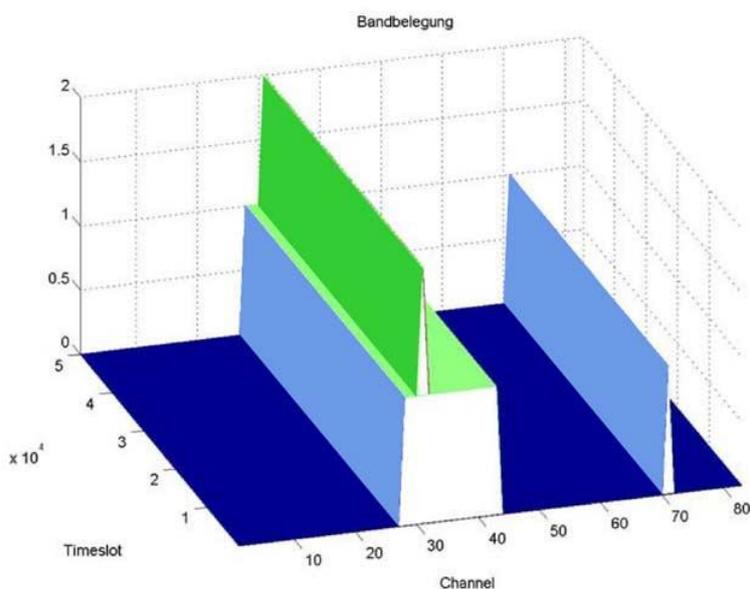
Dazu gibt es mehrere Bilder, da hier verschiedene Fälle betrachtet werden müssen

Subfall1:



Die durch DSM2 gewählten Frequenzen fallen nicht in den durch das Relais belegten Frequenzbereich. Kein Problem. Relais und DSM2 begegnen sich nicht auf der gleichen Frequenz. Es gibt keine Kollisionen und alle sind glücklich. Der große Block in der Mitte ist wieder das Relais, die beiden schmalen Balken die Aussendung von DSM2

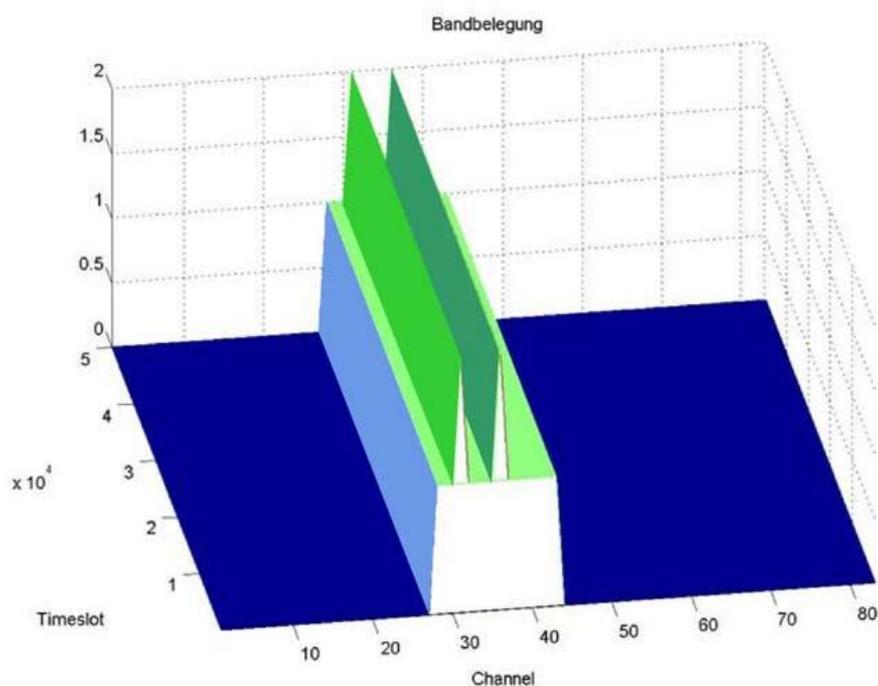
Subfall 2:



Eine der durch DSM2 gewählten Frequenzen fällt in den durch das Relais belegten Frequenzbereich. Daraus ergibt sich dennoch kein Problem, da ja eine Frequenz immer noch

ungestört ist. Allerdings sollte auf der 2. Frequenz kein anderer Störer sein. Hier liegt eine der Frequenzen von DSM2 auf der Aussendung des Relais und kann somit als vollständig gestört betrachtet werden. Die zweite Frequenz ist davon aber nicht betroffen.

Subfall 3:



Die beiden von DSM2 gewählten Frequenzen fallen in den durch das Relais belegten Frequenzbereich und sind somit vollständig gestört. Dann ist leider Schluss mit lustig. In diesem Fall ist der Totalausfall der Steuerung unvermeidlich und der blaue Sack für die kläglichen Überreste des Fliegers sollte bereit stehen. Ungesteuerte Landungen im Hold oder Failsafe gehen nun mal selten ohne Flurschaden über die Bühne. Da stehen leider fast immer sehr stabile Hindernisse wie Rennzäune oder Springbäume im Weg. Auch hier wurde DSM2 als Fallbeispiel gewählt. Es gibt zahlreiche andere Systeme, die ähnliche Verfahren benutzen. Auf diese sind die Ergebnisse von DSM2 uneingeschränkt übertragbar.

Allen Verfahren ist allerdings eines gemeinsam: Es ist keine gute Idee, die Antenne des Relais als Wendemarke zu benutzen. In unmittelbarer Nähe einer Sendeantenne, die ja immerhin 24 W EIRP abstrahlen könnte, wird JEDER Empfänger, unabhängig vom Hersteller, Beifall klatschen und nicht mehr so richtig funktionieren. Der Effekt nennt sich „Blocking“ und ist beim Design von Empfängern ein Quell' ständigen Ärgers. Richtig blockingresistente Empfänger sind für den Modellflug kaum realisierbar, da die Dinger nicht nur groß und schwer sind, sondern sich obendrein noch beliebig viel Strom gönnen. Man sollte also etwas Abstand halten. 100 m sind da sehr hilfreich und soviel Platz ist ja wohl immer vorhanden. Man muss ja nicht unbedingt direkt um eine Antenne herumkurven, deren Aussendung den Flieger vom Himmel holen könnte. Da darf man, ohne Geichtsverlust befürchten zu müssen, ruhig mal ein paar Meter mehr Abstand halten.

Als Fazit kann gesagt werden, dass „echte“ Frequencyhopper, die viele Frequenzen nutzen, den Störer zwar zuverlässig finden und immer durch ihn beeinflusst werden, was im Betrieb aber zunächst nicht weiter auffällt. Diese „echten“ Hopper finden allerdings auch immer die letzte freie Frequenz, auf der sie noch Daten übertragen können. Das sind eben die beiden Seiten der Medaille.

Bei Systemen mit z. B. nur zwei benutzten Frequenzen liegen die Möglichkeiten „macht garnix aus!“ und „das war es dann mit dem Flieger!“ sehr nahe beieinander. Das Manko dieser Systeme ist, dass sie das theoretisch mögliche Maximum des zur Verfügung ste-

henden Spektrums nicht nutzen können. Es ist das konzeptionelle Problem dieser Systeme, die einem nachträglich auftauchenden Störer aufgrund ihrer fixen Frequenzwahl nicht ausweichen können. Ein passender Störer kann diese Systeme leider vollständig außer Gefecht setzen, obwohl der Rest des Bandes frei ist. Allerdings muss hier auch angemerkt werden, dass ein DSM2-System erkennen kann, ob das Relais beim Einschalten der R/C-Anlage aktiv ist, um dann automatisch den Frequenzbereich des Relais zu meiden. Das Gleiche gilt für das Jamara-Jump-System, das beim Verbindungsaufbau nur Frequenzen nutzt, die aus Sicht des Senders frei sind. Bei ACT, Multiplex und Weatronic ist das genaue Verfahren nicht bekannt, aber es gibt die Vermutung, dass diese Systeme die als belegt erkannten Frequenzen ausblenden.

Futaba, IFS und Jeti benutzen starre Hoppingsequenzen, bei denen belegte Frequenzen nicht ausgeblendet werden.

Man kann also abschließend feststellen, dass zumindest bei Verwendung „echter“ Frequency-Hopper die Suppe nicht so heiß gegessen wird, wie sie gekocht wurde. Mit der Verwendung von 35 Mhz-Anlagen umgeht man das hier geschilderte Problem natürlich, solange der erfahrungsgemäß unwahrscheinliche Fall eintritt, dass jeder alle benutzten Frequenzen kennt und beachtet, es gerade keine Überreichweiten gibt oder keiner mit einem ALDI-Flieger hinter'm nächsten Busch steht.

Diversity-Technik Stör/Rauschabstand

aus <http://www.acteurope.de/html/stor_rauschabstand.html

Diversity-Technik ergibt erhebliche Empfangs-Verbesserung ! Warum?

Weil der Rauschabstand erheblich verbessert wird.

Neben dem bei Funk-Übertragungen immer vorhandenen Effekt von Antennen-Richtwirkungen und deren Beseitigung durch Diversity ist der Rauschabstands-Gewinn der Hauptvorteil von Diversity-Technik.

Was ist Rauschabstand

Wir versuchen hier den Begriff Rauschabstand (=Störabstand) , dessen Wert in der Elektronik-Technik für jedes Gerät als größt möglich angestrebt wird, mit einfachen Worten zu erklären.

Je höher der Rauschabstand, desto besser ein System

Besser und deshalb häufig angewendet, obwohl nicht ganz richtig, ist hier der Begriff **Störabstand**. Das ist im Wortsinn für unsere Anwendung deutlich besser zu verstehen (abgewandelt):

Je höher der Störabstand, desto größer der Abstand zu einer Störung

Wenn wir unsere Empfänger so bauen, dass der Störabstand groß ist, können kaum Störungen im Betrieb auftreten.

Einfaches Beispiel für Rausch-Abstand (oder besser Störabstand)

Ein Modell hat eine Störung von aussen, der Empfänger funktioniert nicht mehr. Der Sender ist weit entfernt. Damit ist der Störabstand zu gering bzw. nicht mehr vorhanden, die Störung stärker als das eigene Nutzsignal vom Steuersender.

Gleiche Störung, gleiches Modell, aber - der Sender steht ganz in der Nähe. Der Empfänger funktioniert, das eigene Sender-Signal ist stärker als das Störsignal, der Störabstand ist groß.

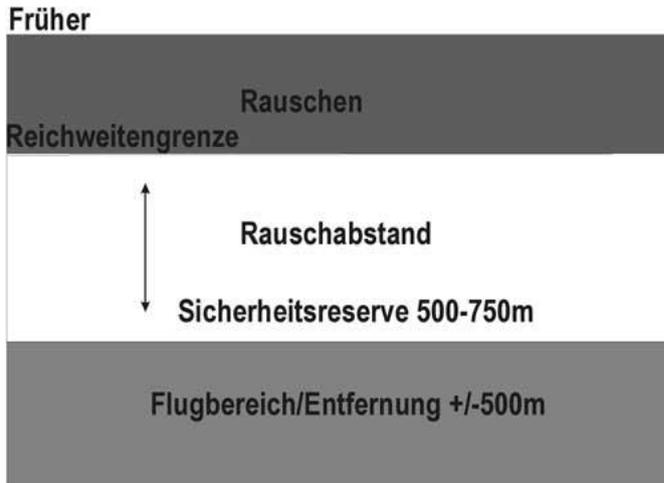
Genau diesen Effekt erzielt man mit Diversity-Empfang - das interne Empfangssignal, welches vom Sender kommt, wird im Verhältnis zu einem möglichen Störsignal erheblich stärker, die Störung hat erheblich weniger Chancen wirksam zu werden, genau wie wenn der Sender näher am Modell steht.

Die gewünschten Diversity-Effekte (Störabstands-Verbesserung + Richtwirkungs-beseitigung) erzielt man nur mit Voll-Duplex-Diversity-Technik (s.u.), bei der beide Empfänger immer in Betrieb sind, die Signale beider Empfänger jeweils multipliziert (bewertet) und dann summiert werden (s.u., Sennheiser).

Eine weitere Steigerung des Störabstandes ergibt sich bei ACT-DDS-Synthesizer-Empfängern, da wird die [Antennen-Abstimmung](#) automatisch auf den jeweils verwendeten Kanal vorgenommen.

Keine Akkuweichen-Empfängerumschaltung kann diese Empfangsverbesserung jemals erzielen, und auch keine einfache Antennenumschaltung, wie teilweise angeboten.

Dazu eine kleine Grafik:



Ideale Bedingungen waren früher ein Modell, 4 Servos, keine Verlängerungskabel. Das Standard-Flugmodell mit 10ccm-Motor von 1980/1985

Damit war der maximale Flugbereich +/- 500m, die sichere Reichweite der Fernsteuerung war ca. 1250m, danach war ein Übergangsbereich zu 0-Funktion mit "Rauschen, indem die Fernsteuerung mal funktionierte, mal nicht. Der Rauschabstand bzw. die Sicherheits-Reserve war ca. 750m.

Wie sieht das heute aus?

Es gilt bis heute der Grundsatz:

Alles, was die Empfangs-Funktion der Fernsteuerung stört oder erschwert, verringert den Rauschabstand (also die Sicherheits-Reserve).

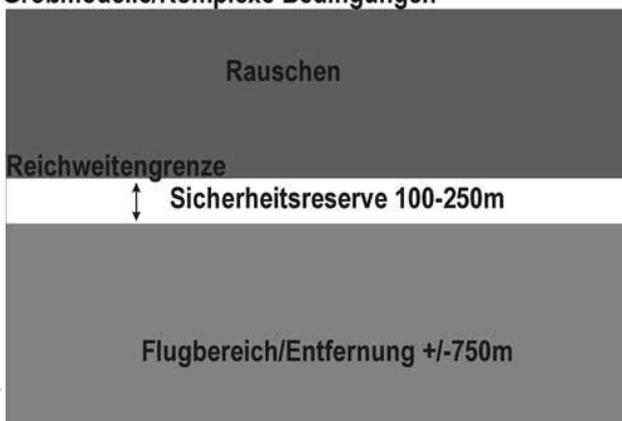
Wir bauen erheblich mehr Servos ein, mehr und längere Kabel, Brushlessregler und Elektromotoren mit hohen Leistungen, Zündungen, usw. usw., jedes Modell wird HF-technisch zum Einzelstück.

Kommen noch die **Funkumweltbedingungen** dazu, welche sich in 30 Jahren sehr zum Nachteil der Funkfernsteuerung verändert haben, denn es gibt viele Funkstrecken mit hoher Leistung, und sehr viel mehr Sender auf allen möglichen Frequenzen. Schlechte Funkumweltbedingungen sind immer vorhanden und müssen berücksichtigt werden.

All das reduziert den Rauschabstand und damit die Sicherheits-Reserve.

Gleichzeitig aber erweitern wird durch die größeren Modelle und durch Jets unseren Flugbereich, +/- 750 m sind da sicher nicht zu hoch gegriffen.....

Großmodelle/Komplexe Bedingungen



Auch bei kleinen Modellen sind oft genügend Störquellen eingebaut, welche die Sicherheitsreserven auffressen.

Ergebnis: Der Rauschabstand reduziert sich erheblich, wir betreiben die Modelle immer knapp am Rande der unter diesen Bedingungen möglichen Funktionsreichweite.

Man könnte natürlich sagen: Ist egal, wir haben ja noch etwas Reserve. Aber -> **Wie knapp es im Einzelfall zur Funktionsgrenze ist wissen wir nicht.**

Warum möglichst große Sicherheits-Reserve?

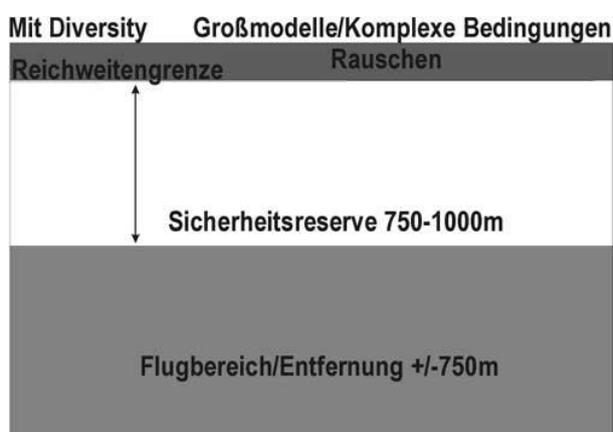
Weil im Flug zusätzliche Erschwernisse vorkommen, nämlich **Richtwirkungen und Schwund**. Beide sind nicht kalkulierbar Größen. Richtwirkungen sind nicht zu vermeiden, denn unsere Modelle bewegen sich und dadurch ändert sich die Ausrichtung der beiden Antennen, Sende- und Empfangsantenne, ständig. Das bedingt Signal-Einbrüche in Größenordnungen von bis zu 40% der Zeit, in der kein Signal oder ein schlechtes Signal am Empfänger ankommt. Richtwirkungen gab es schon immer, aber wenn der Rauschabstand gering ist, wird dadurch aus einem **schlechten oder reduzierten Signal** eben **gar kein Signal**.

Genauso so gravierend wirkt sich der sog Schwund aus. Schwund ergibt Signalschwankungen trotz gleicher Feldstärke bzw. Abständen und Richtungen der Antennen, alleine durch die Bewegung der Modelle in der Luft. Auch Schwund bedingt Signal-Einbrüche in Größenordnungen von bis zu 40% der Zeit, in der kein Signal oder ein schlechtes Signal am Empfänger ankommt. Auch Schwund gab es schon immer, aber wenn der Rauschabstand gering ist, wird dadurch aus einem nur **schlechten oder reduzierten Signal** eben **gar kein Signal**.

Wird die Sicherheitsreserve unterschritten bzw. liegt kein Signal mehr an (s. oben), erfolgt im besten Fall ein kurzer Wackler, bei PCM-Betrieb ein Fail Safe. Da aber ein Empfänger im Fail-Safe Betrieb versucht durch HF-Verstärkung wieder ein gutes Signal zu bekommen, verstärkt er auch Umgebungsstörungen, und Fail Safe kann dann sehr lange dauern.....Erklärt das manche Abstürze mit Fail Safe?

Was tun?

Größere, komplexere Modelle wollen wir nicht verhindern, die Funkumweltbedingungen können wir nicht verändern. Mit nur einem Empfänger ist ein weiterer Empfangs-Fortschritt kaum möglich, aber mit 2 Empfängern und **durch Diversity-Technik kann man den Rauschabstand erhöhen**.



Diversity-Technik reduziert Schwund und Richtwirkungen, und erhöht systembedingt den Rauschabstand durch deutlich verbesserte Empfangsqualität über die 2 Antennen.

Im Ergebnis sieht es so aus, dass selbst bei erhöhter Komplexität und größerem Flugbereich der Modelle und schlechten Funkumweltbedingungen mehr Rauschabstand als früher zur Verfügung steht.

Die Sicherheits-Reserve wird größer, die Sicherheit der Übertragungsstrecke ist erheblich besser.

Vom Erfinder der Diversity-Technik

Diversity-Technik stammt ursprünglich von Senheiser, dort werden Funkmikrophone gebaut. Heute ist diese Empfangsverbesserung Stand der Technik bei allen wichtigen Funkübertragungen, die unterbrechungsfrei arbeiten müssen, auch wenn sich die Funkziele bewegen. Bei 2,4GHz praktisch unumgänglich, bei 35MHz eine erhebliche Steigerung gegenüber Normalempfang mit nur einem Empfänger.

Beschreibung von Senheiser

Die Funkverbindung kann mit Diversity-Technik auch bei frequenz-spezifischen oder räumlichen Störungen oder Unterbrechungen aufrechterhalten werden, indem mit zwei räumlich getrennt platzierten Antennen empfangen wird (Antennendiversity). Zusätzliche Sicherheit gegenüber Störungen auf einer Frequenz erhält man durch Frequenzdiversity, wobei mit zwei Sendern auf verschiedenen Frequenzen gesendet wird. In den dafür vorgesehenen Voll-Duplex-Diversity-Empfängern werden beide Antennensignale getrennt verstärkt, gefiltert und demoduliert. Die beiden demodulierten Signale werden mit ihrer jeweiligen Signalfeldstärke bewertet (multipliziert) und anschließend summiert. Durch dieses Verfahren wird der Übergang vom einen zum anderen Kanal fließend, bei gleichzeitig deutlich erhöhtem Rauschabstand des Nutzsignals. Im Extremfall kann aus zwei stark verrauschten Antennensignalen noch ein brauchbares Nutzsignal gewonnen werden. Ein Diversity-Empfangssystem sorgt daher immer für optimalen Empfang unter schwierigsten Bedingungen. Aus allen diesen Gründen ist Diversity nicht nur eine deutliche Reichweitenerhöhung, sondern auch im Nahbereich erheblich sicherer.

Deshalb Diversity-Technik, in jedes Modell, ob groß oder klein.