

REFERENZKURS - FÜR ALLE ERWACHSENEN

Was ADS-B ist und wie es funktioniert

Zwölf Kapitel. Vorkenntnisse in Luftfahrt oder Funktechnik werden nicht vorausgesetzt; für die Rechenbeispiele genügt Schulmathematik der Sekundarstufe, und man kann sie überspringen, ohne den roten Faden zu verlieren. Lesezeit etwa 50 Minuten.

Lernen - <https://radar.dataero.eu/de/learning/course> 2026-10-22

INHALT

KAPITEL 1 Das Problem: ein Himmel voller Flugzeuge, die niemand sehen kann

KAPITEL 2 Vor ADS-B: Flugzeuge mit Radar finden

KAPITEL 3 Die Idee: Das Flugzeug soll es uns sagen

KAPITEL 4 Wie das Flugzeug weiß, wo es ist

KAPITEL 5 Der Aufbau einer Nachricht

KAPITEL 6 - PHYSIK Die Welle: Funk als unsichtbares Licht

KAPITEL 7 - PHYSIK Reichweite: die Erdkrümmung und das Abklingen des Signals

KAPITEL 8 - PHYSIK Antennen: eine 27 Zentimeter lange Welle einfangen

KAPITEL 9 Empfangen und decodieren

KAPITEL 10 Von einem Empfänger zur Karte eines Kontinents

KAPITEL 11 Wofür es genutzt wird und wo es an Grenzen stößt

KAPITEL 12 Eine kurze Geschichte

Glossar

ALS NÄCHSTES Von der Theorie zur Praxis: den Empfänger bauen

KAPITEL 1

Das Problem: ein Himmel voller Flugzeuge, die niemand sehen kann

An einem gewöhnlichen Werktag durchqueren rund 30.000 Flüge den europäischen Luftraum. Ein Verkehrsflugzeug im Reiseflug bewegt sich mit etwa 250 Metern pro Sekunde, also 900 km/h; zwei Flugzeuge, die aufeinander zufliegen, kommen sich jede Sekunde um einen halben Kilometer näher. Ein Pilot, der aus dem Fenster schaut, sieht davon fast nichts: In 10.000 Metern Höhe sind andere Flugzeuge winzige Punkte, und die meisten verdecken ohnehin die Wolken. Der Himmel ist ein dreidimensionales Straßennetz, auf dem keine Straßen markiert sind, und der Verkehr darauf ist zugleich schnell und unsichtbar.

Die Flugsicherung ist dazu da, diesen Verkehr auseinanderzuhalten. Die Regeln sind im Prinzip einfach: Im kontrollierten Luftraum werden Flugzeuge vertikal mindestens 1.000 Fuß (etwa 300 Meter) voneinander getrennt oder horizontal um einen festgelegten Abstand, typischerweise 5 Seemeilen (9,3 km) im Bereich der Radarabdeckung und weit mehr über den Ozeanen. Um die Regeln anzuwenden, muss ein Fluglotse laufend und zuverlässig die Position jedes Flugzeugs in seinem Sektor kennen: nicht, wo es vor einer Minute war, sondern wo es jetzt ist, wie hoch es fliegt und in welche Richtung. Das ganze Thema dieses Kurses ist, wie dieses Wissen gewonnen wird. Der Fachbegriff dafür lautet **Überwachung** (Surveillance).

Eine Zahl, die man sich merken sollte

Mit 900 km/h legt ein Flugzeug 15 km pro Minute und 250 m pro Sekunde zurück. Jedes Überwachungsverfahren, das sich langsam oder mit großem Fehler aktualisiert, lässt den Lotsen genau über die Entfernungen im Ungewissen, auf die es ankommt.

KAPITEL 2**Vor ADS-B: Flugzeuge mit Radar finden**

Die erste Antwort, entwickelt Ende der 1930er-Jahre und im Zweiten Weltkrieg ausgereift, war das **Primärradar**. Eine große, sich drehende Antenne sendet einen kurzen, sehr starken Impuls an Funkenergie aus. Trifft der Impuls auf ein Flugzeug, wird ein winziger Bruchteil davon zurückgeworfen. Das Radar misst die Zeit zwischen dem Aussenden des Impulses und der Rückkehr des Echos; da sich Funkwellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, 300.000 km/s, ergibt die Zeit die Entfernung. Die Richtung, in die die Antenne zeigte, ergibt die Peilung. Primärradar ist wunderbar unabhängig: Das Flugzeug braucht überhaupt keine Ausrüstung, weshalb das Militär es bis heute nutzt. Es hat aber echte Schwächen. Das Echo eines weit entfernten Flugzeugs ist außerordentlich schwach, der Sender muss also riesig sein. Das Echo verrät nichts darüber, wer das Flugzeug ist oder wie hoch es fliegt. Und die Antenne braucht mehrere Sekunden für eine Umdrehung, sodass jedes Flugzeug nur alle 4 bis 12 Sekunden erfasst wird, in denen es sich um bis zu 3 km weiterbewegt hat.

Die zweite Antwort, das **Sekundärradar** (SSR, Secondary Surveillance Radar), machte das Flugzeug zum Beteiligten. Eine Bodenstation sendet auf 1030 MHz eine Frage, eine *Abfrage*. Ein kleines Funkgerät an Bord, der **Transponder**, hört die Frage und antwortet auf 1090 MHz mit einem eigenen starken Signal. Weil die Antwort gesendet und nicht reflektiert wird, ist sie millionenfach stärker als ein Radarecho, und weil sie von einem Computer erzeugt wird, kann sie Informationen tragen. In der ältesten Form (Mode A) enthält die Antwort einen vierstelligen Kenncode, den der Lotse zuweist; in Mode C zusätzlich die Flughöhe. In den 1980er-Jahren kam **Mode S** („S“ für selektiv) hinzu: Jeder Transponder hat eine eindeutige 24-Bit-Adresse, kann einzeln abgefragt werden und mit Datennachrichten von 56 oder 112 Bit antworten. Merken Sie sich diese Zahl, 1090 MHz, und dieses Wort, Mode S: ADS-B baut direkt auf beidem auf.

Das Sekundärradar war ein großer Fortschritt, teilt aber zwei Einschränkungen mit seinem Vorgänger. Das Flugzeug spricht nur, wenn es gefragt wird, also braucht es am Boden weiterhin eine abfragende Station in Reichweite, was Ozeane, Wüsten und Gebirge ausschließt. Und die Station braucht weiterhin eine drehende Antenne, um zu wissen, aus welcher Richtung die Antwort kam, sodass jedes Flugzeug nur einmal pro Umdrehung erfasst wird und der Bildschirm des Lotsen einen Punkt zeigt, der alle paar Sekunden springt, statt eines sich gleichmäßig bewegenden Flugzeugs. Um das zu verbessern, war etwas grundlegend anderes nötig: ein Weg, auf dem das Flugzeug seine Position meldet, ohne gefragt zu werden, und ohne dass der Boden überhaupt etwas messen muss.

KAPITEL 3

Die Idee: Das Flugzeug soll es uns sagen

In den 1990er-Jahren waren zwei Technologien ausgereift, die einen anderen Ansatz möglich machten. Die Satellitennavigation verschaffte jedem entsprechend ausgerüsteten Flugzeug eine genaue Kenntnis seiner eigenen Position, weit besser, als jedes Radar sie vom Boden aus messen konnte. Und der Mode-S-Transponder bot bereits ein Funkgerät, das Datennachrichten auf 1090 MHz senden konnte. Bringt man beides zusammen, ist die Logik zwingend: Statt dass der Boden mühsam misst, wo das Flugzeug ist, soll das Flugzeug, das es ohnehin weiß, es einfach sagen, in regelmäßigen Abständen, allen. Das ist ADS-B, und die vier Wörter seines Namens beschreiben es genau.

Es ist **automatisch** (automatic): Nichts löst eine Sendung aus. Der Transponder sendet nach seinem eigenen Takt, etwa zweimal pro Sekunde, ob eine Bodenstation in Reichweite ist oder nicht und ob der Pilot etwas tut oder nicht; tatsächlich kann der Pilot es im Flug nur stoppen, indem er den Transponder ausschaltet, und das ist verboten. Es ist **abhängig** (dependent): Jeder Inhalt der Nachricht stammt von der Ausrüstung des Flugzeugs selbst, die Position von seinem Satellitenempfänger, die Höhe von seinem barometrischen Höhenmesser, und der Boden misst nichts; er vertraut dem, was ihm gesagt wird. Es ist **Überwachung** (surveillance): Sein Zweck ist, andere wissen zu lassen, wo das Flugzeug ist, für die Flugsicherung und für Flugzeuge in der Nähe, im Unterschied zur Navigation, bei der das Flugzeug selbst weiß, wo es ist, und zur Kommunikation, bei der mit dem Piloten gesprochen wird. Und es ist eine **Ausstrahlung** (broadcast): Die Nachricht hat keinen Empfänger, keine Bestätigung und keine Verschlüsselung, und jeder mit einem Empfänger in Reichweite hört genau dasselbe, ob Kontrollzentrum, anderes Verkehrsflugzeug oder Schule.

„Abhängig“ ist das Wort, das Ingenieuren Sorgen macht, und dasjenige, dessen Erklärung sich am meisten lohnt. Radar macht eine unabhängige Messung: Wenn die Instrumente des Flugzeugs falsch anzeigen, kümmert das das Radar nicht. ADS-B erbt jeden Fehler des Navigationssystems des Flugzeugs, und wenn dieses System getäuscht wird oder ausfällt, wird die falsche Position mit derselben Gewissheit ausgestrahlt. Deshalb trägt jede ADS-B-Nachricht neben der Position eine Angabe darüber, wie sehr das Flugzeug seiner eigenen Position vertraut (die Integritäts- und Genauigkeitskategorien aus Kapitel 5), und deshalb wurde das Radar nicht abgeschaltet.

„Ausstrahlung“ ist das Wort, das diesen Kurs möglich macht. Weil die Nachrichten unverschlüsselt an alle gesendet werden, hört sie nicht nur die Flugsicherung, sondern jeder auf 1090 MHz abgestimmte Empfänger, auch der, den Sie vielleicht auf ein Schuldach stellen. Dieselbe Eigenschaft ist die Quelle der wichtigsten Einschränkung des Systems, die in Kapitel 11 behandelt wird: Eine Nachricht, die jeder lesen kann, kann auch jeder fälschen.

KAPITEL 4

Wie das Flugzeug weiß, wo es ist

Alles an ADS-B beruht darauf, dass das Flugzeug seine eigene Position kennt; in diesem Kapitel geht es daher um Satellitennavigation. Der Oberbegriff lautet **GNSS**, Global Navigation Satellite System; das amerikanische GPS ist das bekannteste, und das europäische Galileo, das russische GLONASS und das chinesische BeiDou arbeiten nach demselben Prinzip. Jedes System ist eine Konstellation von etwa 24 bis 30 Satelliten, die in rund 20.000 km Höhe kreisen, weit über den Flugzeugen, und jeder trägt eine

Atomuhr, die auf wenige milliardstel Sekunden genau ist. Jeder Satellit sendet fortlaufend ein Funksignal, das sinngemäß sagt: „Hier ist Satellit Nummer N, meine Position ist soundso, und der Zeitpunkt, zu dem ich dies gesendet habe, ist genau T.“

Der Empfänger im Flugzeug hört dieses Signal etwas später, denn Funkwellen brauchen Zeit: Bei 300.000 km/s dauern die 20.000 km vom Satelliten etwa 67 tausendstel Sekunden. Der Empfänger vergleicht den in der Nachricht vermerkten Zeitpunkt mit dem Ankunftszeitpunkt. Die Differenz, multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit, ist die Entfernung zu diesem Satelliten. Eine Entfernung legt den Empfänger irgendwo auf eine Kugel um diesen Satelliten. Zwei Kugeln schneiden sich in einem Kreis, drei Kugeln in zwei Punkten, von denen einer meist absurd ist (tief unter der Erde oder weit draußen im All) und verworfen wird. Drei Satelliten würden also genügen, wenn der Empfänger eine perfekte Uhr hätte.

Die hat er nicht. Eine Atomuhr kostet Zehntausende Euro und würde nicht hineinpassen; der Empfänger hat eine billige Quarzuhr, die weit stärker danebenliegen kann, als die nötige Zeitgenauigkeit erlaubt. Und hier kommt der elegante Teil. Der Empfänger behandelt seinen eigenen Uhrenfehler als vierte Unbekannte, neben seinen drei Positionskoordinaten, und hört einen vierten Satelliten ab. Vier Gleichungen, vier Unbekannte: Der Empfänger berechnet seine Position und korrigiert nebenbei seine eigene Uhr auf wenige Dutzend Nanosekunden genau. Deshalb braucht ein Satellitenempfänger mindestens vier Satelliten in Sicht, und deshalb ist jeder GNSS-Empfänger nebenbei auch eine der genauesten Uhren im Gebäude.

Es lohnt sich, bei den Größenordnungen zu verweilen, denn sie erklären, warum Satellitennavigation eigentlich eine Übung in Zeitmessung ist und die Geometrie nur Beiwerk. Licht legt in einer Nanosekunde 30 Zentimeter und in einer Mikrosekunde 300 Meter zurück; ein Zeitfehler von einer millionstel Sekunde wird also zu einem Positionsfehler von 300 Metern, und die Genauigkeit eines modernen Empfängers von wenigen Metern entspricht einer Zeitmessung auf etwa zehn Nanosekunden. Ein konkretes Beispiel: Ein Satellit versieht ein Signal mit der Zeit 12:00:00,000 000 000; der Empfänger des Flugzeugs hört es um 12:00:00,070 000 000. Die Laufzeit beträgt 0,070 s, die Entfernung also $0,070 \times 300.000 \text{ km/s} = 21.000 \text{ km}$. Wäre die Uhr des Empfängers nur eine einzige Mikrosekunde vorgegangen, hätte er 21.000,3 km berechnet, 300 Meter zu weit, und derselbe Fehler hätte sich auch in die Entfernung zu jedem anderen Satelliten eingeschlichen. Genau diesen gemeinsamen Fehler deckt der vierte Satellit auf und beseitigt ihn.

Zwei Höhen, nicht eine

Satelliten liefern eine Höhe über der mathematischen Erdoberfläche, eine *geometrische* Höhe. Doch die Höhe, die ein Flugzeug für die Flugsicherung ausstrahlt, ist nicht diese. Es ist die **barometrische Höhe**, abgeleitet aus dem Luftdruck außerhalb des Flugzeugs, gemessen über eine kleine Öffnung im Rumpf, die statische Druckentnahme. Der Luftdruck nimmt mit der Höhe auf bekannte Weise ab (in Bodennähe etwa 1 hPa pro 8 Meter, weiter oben langsamer), und jeder Höhenmesser der Welt rechnet den Druck mit derselben Standardatmosphäre in Höhe um, bezogen auf 1013,25 hPa auf Meereshöhe. An einem Tag mit ungewöhnlichem Luftdruck liegt die barometrische Höhe jedes Flugzeugs um denselben Betrag daneben, und genau darum geht es: Für die Staffelung zählt nicht die wahre Höhe über dem Meer, sondern dass zwei Flugzeuge, die beide „Flughöhe 350“ anzeigen, wirklich 300 Meter von einem

entfernt sind, das „Flugfläche 340“ anzeigt. ADS-B strahlt in seinen Positionsnachrichten die barometrische Höhe in Schritten von 25 Fuß (7,6 m) aus und sendet getrennt die Differenz zwischen ihr und der Satellitenhöhe, sodass ein Empfänger beide ermitteln kann.

KAPITEL 5

Der Aufbau einer Nachricht

Die ADS-B-Nachricht, die Verkehrsflugzeuge weltweit verwenden, ist eine Mode-S-Aussendung namens **Extended Squitter**; „Squitter“ ist alter Radarjargon für eine Aussendung, die spontan und nicht als Antwort erfolgt, und „extended“ (erweitert), weil sie mit 112 Bit doppelt so lang ist wie die ursprüngliche Mode-S-Antwort. Ingenieure schreiben „1090ES“ für „1090 MHz Extended Squitter“. Jede Aussendung dauert insgesamt 120 Mikrosekunden: eine *Präambel* von 8 Mikrosekunden, ein festes Muster aus vier Impulsen, an dem ein Empfänger den Beginn einer Nachricht erkennt und seinen Takt synchronisiert, gefolgt von 112 Datenbits mit einem Bit pro Mikrosekunde.

Wie ein Bit gesendet wird: Pulspositionsmodulation

Jedes Bitfenster von einer Mikrosekunde wird in zwei Hälften geteilt. Ein Impuls Funkenergie in der ersten Hälfte und Stille in der zweiten bedeutet 1; erst Stille und dann ein Impuls bedeutet 0. Es gibt also genau einen Impuls pro Bit, unabhängig von den Daten, und der Empfänger muss nur entscheiden, welche Hälfte jedes Fensters lauter war. Dieses Verfahren, die Pulspositionsmodulation, ist robust gegen die Arten von Rauschen und Schwund, die ein Signal auf seinem Weg vom Transponder zu einer entfernten Antenne erleidet, und es lässt sich billig decodieren.

Vier Bits in Pulspositionsmodulation: 1, 0, 1, 1



Jedes Fenster dauert 1 Mikrosekunde. Impuls in der ersten Hälfte: 1. Impuls in der zweiten Hälfte: 0.

Die 112 Bit

DF	CA	ICAO-Adresse	ME - die Nutzdaten	PI
5 Bit	3 Bit	24 Bit	56 Bit	24 Bit
Downlink-Format	Capability	eindeutige Kennung des Flugzeugs	Position, Höhe, Geschwindigkeit, Rufzeichen oder Status, je nach Typcode in den ersten 5 Bit	Fehlerprüfung (CRC)

Die ersten fünf Bit, das Downlink-Format, geben an, um welche Art von Mode-S-Nachricht es sich handelt; der Wert 17 bedeutet „ADS-B von einem Mode-S-Transponder“. Die 24-Bit-**ICAO-Adresse** ist die dauerhafte Identität des Flugzeugs, vergeben bei seiner Zulassung: Es gibt 2^{24} , also 16.777.216 mögliche Adressen, die von der ICAO, der Zivilluftfahrtorganisation der UN, blockweise an Staaten verteilt werden. Belgische Flugzeuge zum Beispiel tragen Adressen von 448000 bis 44FFFF in hexadezimaler Schreibweise. Anders als der vierstellige Code des alten Mode A ändert sich diese Adresse nie und wird nie geteilt, sodass ein Empfänger schon ab der allerersten Nachricht sicher weiß, welches Flugzeug er hört.

Das 56-Bit-Feld **ME** ist der eigentliche Inhalt, und seine ersten fünf Bit, der *Typcode*, sagen, was der Rest bedeutet. Die Typcodes 1 bis 4 tragen das Rufzeichen des Flugzeugs, etwa BEL1234 oder RYR7KL, als acht Zeichen zu je sechs Bit. Die Codes 9 bis 18 tragen eine Position in der Luft mit barometrischer Höhe, 20 bis 22 dasselbe mit Satellitenhöhe. Code 19 trägt die Geschwindigkeit: die Geschwindigkeit über Grund, zerlegt in eine Ost-West- und eine Nord-Süd-Komponente, die Vertikalgeschwindigkeit und die Differenz zwischen barometrischer und Satellitenhöhe. Die Codes 28, 29 und 31 tragen den Status: Notfallcodes, die gewählte Höhe sowie die Integritäts- und Genauigkeitskategorien, die angeben, wie weit man der ausgestrahlten Position trauen kann (ein „NIC“ von 8 etwa verspricht, dass die wahre Position mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb von 185 m um die gemeldete liegt).

Die letzten 24 Bit sind eine **zyklische Redundanzprüfung** (CRC), eine Zahl, die aus den vorangehenden 88 Bit durch eine festgelegte Polynomdivision berechnet wird. Der Empfänger wiederholt die Berechnung mit den Bits, die er decodiert hat; stimmt das Ergebnis nicht überein, wurde unterwegs mindestens ein Bit verfälscht, und die Nachricht wird verworfen. Da ein Impuls von einer Mikrosekunde leicht im Rauschen oder in einer überlappenden Nachricht eines anderen Flugzeugs untergehen kann, ist es diese Prüfung, die verstümmelte Positionen vom Bildschirm des Lotsen fernhält. Eine echte Nachricht, wie ein Empfänger sie protokollieren würde, sieht so aus:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: Downlink-Format 17, Fähigkeit 5. 4840D6: ICAO-Adresse, ein niederländisches Flugzeug. 20...: Typcode 4, eine Identifikationsnachricht, die zum Rufzeichen KLM1023 decodiert wird. 576098: die Fehlerprüfung.

Die Erde in 34 Bit unterbringen

Eine Positionsnachricht hat nur 17 Bit für die Breite und 17 für die Länge. Das sind 131.072 Schritte um den ganzen Globus, jeder etwa 300 m am Äquator: bei Weitem nicht genau genug. ADS-B löst das mit der **kompakten Positionsmeldung** (Compact Position Reporting, CPR). Die Erde wird in Zonen eingeteilt; die 17 Bit geben eine sehr genaue Position (auf etwa 5 m) innerhalb einer Zone an, aber nicht, welche Zone es ist. Das Flugzeug wechselt zwischen zwei leicht unterschiedlichen Zonenrastern ab, „geraden“ und „ungeraden“ Nachrichten, und ein Empfänger, der je eine davon gehört hat, kann die Zone eindeutig bestimmen. Danach genügt eine einzige Nachricht, um dem Flugzeug zu folgen, denn es kann kaum in einer halben Sekunde in eine andere Zone gesprungen sein. Ein geschickter Kniff, der die nutzbare Genauigkeit verdoppelt, ohne ein einziges Bit mehr zu kosten.

Wie oft

Ein Transponder im Flug sendet zweimal pro Sekunde eine Positionsnachricht, zweimal pro Sekunde eine Geschwindigkeitsnachricht und alle fünf Sekunden sein Rufzeichen, dazu Statusnachrichten in längeren Abständen, insgesamt also etwa vier bis fünf Extended Squitter pro Sekunde. Jeder dauert 120 Mikrosekunden; der Transponder sendet tatsächlich weit weniger als ein Tausendstel der Zeit ADS-B. Den Rest der Sekunde horcht er auf Radarabfragen auf 1030 MHz und auf die Anfragen der Kollisionswarnsysteme anderer Flugzeuge und beantwortet sie.

KAPITEL 6 - PHYSIK

Die Welle: Funk als unsichtbares Licht

Die Nachricht verlässt das Flugzeug als **Funkwelle**, und die nützlichste Idee dieses ganzen Kurses ist, dass eine Funkwelle und ein Lichtstrahl dasselbe sind. Beide sind elektromagnetische Wellen: ein Muster aus elektrischen und magnetischen Feldern, die gemeinsam schwingen und sich mit Lichtgeschwindigkeit c durch den Raum bewegen, also mit 299.792.458 Metern pro Sekunde oder in guter Näherung 300.000 km/s. Was eine Funkwelle von grünem Licht, von den Röntgenstrahlen im Krankenhaus oder von den Mikrowellen im Küchenofen unterscheidet, ist allein, wie schnell die Felder schwingen: die **Frequenz** f , gemessen in Hertz (Schwingungen pro Sekunde).

Da sich die Welle mit fester Geschwindigkeit ausbreitet, legt die Frequenz den Abstand zwischen einem Wellenberg und dem nächsten fest, die **Wellenlänge** λ . In einer Sekunde legt die Welle c Meter zurück und vollführt f Schwingungen; jede Schwingung nimmt also c / f Meter ein:

$$c = f \times \lambda$$

Für ADS-B: $\lambda = 300\,000\,000 / 1\,090\,000\,000 = 0,275$ m. Die Welle zwischen dem Flugzeug und Ihrer Antenne hat Wellenberge im Abstand von 27,5 cm, etwa die Länge eines Schullineals.

Welle	Frequenz	Wellenlänge	Anmerkung
UKW-Rundfunk	100 MHz	3 m	Autoantennen sind ein Bruchteil davon
ADS-B / Mode S	1.090 MHz	27,5 cm	Auch für Transponderantworten an das Radar genutzt
Mobiltelefon (4G-Band)	1.800 MHz	17 cm	Ein naher Nachbar im Spektrum
WLAN, Mikrowellenherd	2.450 MHz	12 cm	Gleiche Frequenz, völlig andere Leistung
Sichtbares grünes Licht	560.000.000 MHz	0,000 54 mm	Eine halbe Million Mal höhere Frequenz

Zwei Folgerungen sind für alles Weitere wichtig. Erstens: Da die Welle Licht ist, breitet sie sich geradlinig aus, sofern nichts sie beugt oder blockiert, und sie geht nicht durch die Erde. Das bestimmt die Reichweite des Systems, das Thema von Kapitel 7. Zweitens: Da ihre Wellenlänge 27,5 cm beträgt, haben die Metallstrukturen, die am stärksten mit ihr wechselwirken, die Antennen, ungefähr diese Größe, das Thema von Kapitel 8.

Warum Funk kein Schall ist

Die häufigste Verwechslung, bei Erwachsenen ebenso wie bei Kindern, ist die zwischen Funk und Schall, wohl weil ein „Radio“ ein Kasten ist, der Töne erzeugt. Es sind voneinander unabhängige Phänomene. Schall ist eine Druckwelle in der Luft, eine Kette von Molekülen, die gegen ihre Nachbarn stoßen; er braucht ein Material, um sich auszubreiten, bewegt sich mit 340 m/s und kann kein Vakuum durchqueren. Funk braucht nichts: Er durchquert das Vakuum zwischen einem Satelliten und dem Flugzeug und ist fast eine Million Mal schneller. Der Triebwerkslärm des Flugzeugs und seine ADS-B-Nachricht verlassen es im selben Augenblick; die Nachricht erreicht einen 20 km entfernten Empfänger nach 67 Mikrosekunden, der Schall eine volle Minute später.

Warum 1090 MHz

Die Frequenz ist ein Erbe. Internationale Abkommen der 1950er-Jahre reservierten das Band von 960 bis 1215 MHz für die Flugnavigation, und 1090 MHz wurde die Antwortfrequenz der Sekundärradar-Transponder. Als ADS-B entworfen wurde, war es weit billiger, den in jedem Verkehrsflugzeug bereits eingebauten Transponder weiterzuverwenden, als ein neues Funkgerät einzubauen; ADS-B wurde also einfach zu einer weiteren Sache, die der Mode-S-Transponder auf 1090 MHz sagt. In den Vereinigten Staaten dürfen kleinere Flugzeuge, die unterhalb von etwa 5.500 m fliegen, stattdessen ein zweites System nutzen, UAT auf 978 MHz, weshalb Empfänger dort oft auf beiden Frequenzen hören.

KAPITEL 7 - PHYSIK

Reichweite: die Erdkrümmung und das Abklingen des Signals

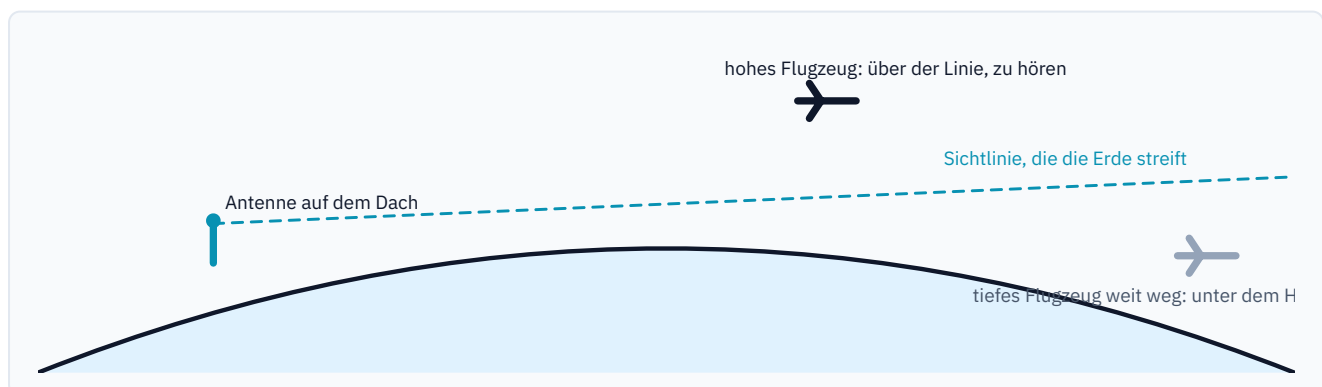
Ein Transponder sendet mit einer Spitzenleistung von einigen hundert Watt. Wie weit entfernt lässt sich ein solches Signal hören? Zwei ganz verschiedene Dinge begrenzen es, und man sollte sie auseinanderhalten: die Geometrie, die eine harte Grenze setzt, und die Leistung, die eine weiche setzt.

Der Funkhorizont

Bei 1090 MHz verhält sich Funk wie Licht: Er breitet sich geradlinig aus und biegt sich nicht um die Erde. Eine Bodenantenne kann ein Flugzeug daher nur hören, solange es zwischen beiden eine gerade Linie gibt, die nicht durch den Boden führt. Für einen Beobachter an der Oberfläche liegt der Horizont dort, wo diese Linie die Erde gerade noch streift. Je höher das Flugzeug, desto weiter entfernt liegt dieser Berührungspunkt; je höher die Antenne, desto weiter noch. Die Geometrie einer Tangente an eine Kugel liefert ein einfaches Ergebnis: Die Entfernung zum Horizont in Kilometern beträgt etwa das 3,57-Fache der Quadratwurzel der Höhe in Metern. Die Atmosphäre krümmt Funkwellen leicht nach unten, was den Horizont um rund 15 Prozent erweitert; Ingenieure verwenden deshalb 4,12:

$$d \text{ (km)} = 4,12 \times (\sqrt{h \text{ Flugzeug}} + \sqrt{h \text{ Antenne}}) \quad \text{Höhen in Metern}$$

Flugzeug in 11.000 m, Antenne auf einem 20 m hohen Dach: $4,12 \times (104,9 + 4,5) = 451 \text{ km}$. Flugzeug in 1.000 m, gleiches Dach: $4,12 \times (31,6 + 4,5) = 149 \text{ km}$. Flugzeug am Boden in 15 km Entfernung: überhaupt nicht zu hören, es sei denn, das Gelände dazwischen ist flach und frei.



Das erklärt die typische Form der Abdeckung eines Empfängers: ein Kreis von 400 km oder mehr für hoch fliegenden Verkehr, der für Flugzeuge im Anflug auf wenige Dutzend Kilometer schrumpft, und fast nichts für Flugzeuge am Boden, außer am Flughafen nebenan. Es erklärt auch, warum die Höhe eines

Empfängers weit mehr zählt als seine Qualität, und warum ein Hügel, ein hohes Gebäude oder sogar die eigene Tragfläche des Flugzeugs, wenn es sich von Ihnen weg in die Kurve legt, ein Signal schlagartig abschneiden kann.

Das Abstandsquadratgesetz

Innerhalb des Horizonts wird das Signal mit der Entfernung schwächer. Eine Transponderantenne strahlt in alle horizontalen Richtungen ab, ihre Leistung verteilt sich also über eine immer größere Kugel. Die Oberfläche einer Kugel wächst mit dem Quadrat ihres Radius, also fällt die Leistung, die auf eine Antenne fester Größe trifft, mit dem Quadrat der Entfernung: doppelt so weit, ein Viertel der Leistung; zehnmal so weit, ein Hundertstel. Ingenieure drücken das als *Freiraumdämpfung* in Dezibel aus, und für 1090 MHz über 400 km ergibt sich etwa 145 dB, das heißt, die empfangene Leistung ist rund 10 hoch 14,5 Mal kleiner als die gesendete. Ein Impuls von 250 Watt kommt als etwa ein Zehntel eines milliardstel Milliwatts an. Ein guter Empfänger kann das gerade noch erkennen, und deshalb fallen der geometrische Horizont und die Leistungsgrenze bei einigen hundert Kilometern zusammen: Das System wurde so ausgelegt.

Die beiden Grenzen wirken auf eine Weise zusammen, die es zu verstehen lohnt. Innerhalb des Horizonts werden ein starkes Signal eines nahen Flugzeugs und ein schwaches eines fernen Flugzeugs gleichermaßen perfekt decodiert, denn das Pulspositionsverfahren aus Kapitel 5 fragt nur, welche Hälfte jedes Bitfensters lauter war, nicht wie laut. Das Signal verliert nicht allmählich an Brauchbarkeit, während sich das Flugzeug entfernt; es bleibt decodierbar, bis irgendwo nahe dem Horizont entweder die Geometrie es abschneidet oder das Rauschen im Empfänger es schließlich übertönt, und die Spur endet. Deshalb haben Abdeckungskarten scharfe Ränder, und deshalb sind die entferntesten Flugzeuge, die ein Empfänger hört, fast immer die am höchsten fliegenden.

KAPITEL 8 - PHYSIK

Antennen: eine 27 Zentimeter lange Welle einfangen

Eine Antenne ist ein Stück Leiter, das so geformt ist, dass eine vorbeiziehende elektromagnetische Welle die Elektronen darin im Gleichtakt in Bewegung setzt und so einen winzigen Wechselstrom erzeugt, den ein Empfänger verstärken kann. Im Sender geschieht das Umgekehrte: Ein Wechselstrom in der Antenne des Flugzeugs erzeugt die Welle. Wie gut dieser Austausch funktioniert, hängt von der Größe des Leiters im Verhältnis zur Wellenlänge ab. Ein gerader Draht reagiert am stärksten, er *schwingt in Resonanz*, wenn er eine halbe Wellenlänge lang ist, sodass der Strom, der in ihm hin und her schwappt, genau zur Schwingung der Welle passt, wie eine Kinderschaukel, die in ihrem eigenen Rhythmus angestoßen wird. Für 1090 MHz beträgt eine halbe Wellenlänge 13,75 cm.

Die in der Praxis häufigste Form ist der **Viertelwellen-Monopol**: ein senkrechter Stab von einer Viertelwellenlänge, 6,9 cm, der auf einer leitenden Fläche steht, der *Massefläche* (Ground Plane). Die Massefläche wirkt wie ein Spiegel, sodass sich Stab und Spiegelbild zusammen wie eine Halbwellenantenne verhalten. Deshalb ist die ADS-B-Antenne eines Flugzeugs eine kurze Flosse von wenigen Zentimetern Höhe auf dem Rumpf, wobei der Rumpf die Massefläche bildet, und deshalb besteht die Antenne eines Bastlers aus einem kurzen Draht auf einem Blechdeckel. Ein Draht der falschen Länge funktioniert auch, aber viel schlechter: Das „Ohr aus Metall“ ist abgestimmt.

Drei weitere Eigenschaften der Antenne folgen aus der Physik, und jede hat eine sichtbare Folge. Die erste ist die **Polarisation**. Das elektrische Feld einer elektromagnetischen Welle schwingt in einer bestimmten Richtung senkrecht zu ihrer Ausbreitung, und eine Antenne reagiert nur auf den Anteil des Feldes entlang ihrer eigenen Länge. Flugzeugantennen sind senkrecht montiert, die ADS-B-Welle kommt also vertikal polarisiert an, und eine Empfangsantenne muss ebenfalls senkrecht stehen; seitlich gelegt hört sie fast nichts, so wie eine auf und ab geschüttelte Seilwelle von einem waagerechten Schlitz aufgehalten wird. Die zweite ist das **Strahlungsdiagramm**. Eine senkrechte Antenne ist zum Horizont hin am empfindlichsten und entlang ihrer eigenen Achse gar nicht, sodass ihre Empfindlichkeit im Raum die Form eines Donuts hat, durch dessen Loch die Antenne führt. Empfänger hören daher ganz selbstverständlich Flugzeuge in 300 km Entfernung und verlieren eines, das direkt über sie hinwegfliegt, für einige Sekunden, etwas, worauf man auf jeder Live-Karte achten kann. Stapelt man mehrere resonante Elemente übereinander, wird der Donut flacher gedrückt und die Empfindlichkeit zum Horizont hin gebündelt, wo die fernen Flugzeuge sind, auf Kosten der Richtung nach oben; das ist mit dem **Gewinn** einer Antenne gemeint, und er ist immer eine Umverteilung von Empfindlichkeit, nie deren Erzeugung.

Die dritte betrifft das, was zwischen Antenne und Empfänger liegt. Die Antenne fängt nicht nur 1090 MHz auf, sondern jedes Signal in der Umgebung, darunter Mobilfunksignale wenige hundert Megahertz daneben, die ungleich stärker sind; deshalb kommt zuerst ein Filter, das nur das Flugfunkband durchlässt. Dann muss das Signal durch ein Kabel, und bei 1090 MHz verliert ein Koaxialkabel etwa alle zehn Meter die Hälfte des Signals; Abhilfe schafft ein rauscharmer Verstärker an der Antenne, vor dem Kabel, damit das Signal stark genug ist, um den Weg zu überstehen, und nicht erst am Empfänger, wo man das Rauschen des Kabels zusammen mit dem Rest des Signals verstärken würde. Das sind Details, aber es sind die Details, die entscheiden, ob ein Empfänger auf einem Schuldach die Flugzeuge am Horizont hört oder nur die in der Nähe.

KAPITEL 9

Empfangen und decodieren

Zwischen der Antenne und einem Punkt auf einer Karte liegt eine Kette aus fünf Stufen. Die Antenne wandelt die vorbeiziehende Welle in einen Wechselstrom von wenigen Mikrovolt. Ein Filter und ein rauscharmer Verstärker behalten das 1090-MHz-Band, unterdrücken alles andere und heben das Signal auf das Tausendfache an. Ein softwaredefiniertes Radio stimmt sich auf die Frequenz ab und tastet das Signal zwei Millionen Mal pro Sekunde ab, wodurch ein Strom von Zahlen entsteht. Ein Decoder sucht in diesem Strom nach dem Muster der Präambel, liest die 112 Bit ab, prüft die Parität und decodiert die Felder. Und ein Tracker fasst die Nachrichten jedes Flugzeugs zu einem einzigen, laufend aktualisierten Datensatz zusammen: eine Position, ein Kurs, eine Beschriftung.

Bemerkenswert ist die dritte Stufe. Bis etwa 2010 brauchte man zum Decodieren von 1090 MHz eigens gebaute Hardware für Tausende Euro. Dann entdeckten Bastler, dass ein USB-Fernsehempfänger für 20 Euro einen Chip enthielt, den man auf jede beliebige Frequenz abstimmen und das Rohsignal an einen Computer weitergeben lassen konnte. Dieses **softwaredefinierte Radio** (SDR) verwandelt das Funkproblem in ein Programmierproblem: Ein Laptop oder ein Raspberry Pi erhält einen Strom von zwei Millionen Zahlen pro Sekunde, die die Signalstärke beschreiben, und freie Software sucht das Muster der

Präambel, misst, welche Hälfte jedes Mikrosekundenfensters lauter ist, setzt 112 Bit zusammen, berechnet die CRC und gibt die Felder aus. Das Empfängerprojekt im Paket für die Sekundarstufe ist genau diese Kette, und eine Schule kann sie für unter 100 Euro aufbauen.

In der Tracker-Stufe wird aus dem Nachrichtenstrom Wissen. Eine einzelne Positionsnachricht ist, wie gesagt, mehrdeutig, bis eine gerade und eine ungerade Nachricht zusammengeführt wurden. Die Geschwindigkeit kommt getrennt von der Position, das Rufzeichen wiederum getrennt, und der Tracker fügt sie anhand der ICAO-Adresse zusammen, verwirft alles, was die Fehlerprüfung nicht besteht, und hält den letzten bekannten Zustand jedes Flugzeugs fest. Kommt eine Minute lang keine Nachricht an, meist weil das Flugzeug unter den Horizont gesunken ist, verfällt die Spur.

KAPITEL 10

Von einem Empfänger zur Karte eines Kontinents

Ein Empfänger hört einen Kreis Himmel von einigen hundert Kilometern Durchmesser. Eine Karte Europas braucht Hunderte davon, und die nützlichen stehen nicht in Städten, sondern verteilt: an Küsten, in Tälern, auf Inseln, überall dort, wo der Kreis eines anderen Empfängers nicht hinreicht. Jeder Empfänger schickt seine decodierten Nachrichten, jede mit dem Zeitpunkt ihres Eintreffens versehen, über das Internet an einen zentralen Dienst. Dieser Dienst *aggregiert*: Dieselbe Nachricht eines hoch fliegenden Flugzeugs kommt typischerweise von zehn oder zwanzig Empfängern gleichzeitig an, und die Duplikate müssen erkannt und zusammengeführt werden. Er prüft auch: Eine Position, die der Sicht jedes benachbarten Empfängers auf dasselbe Flugzeug widerspricht, ist wahrscheinlich ein Decodierfehler oder stammt von einem defekten Transponder und wird markiert oder verworfen.

Multilateration: Flugzeuge finden, die nicht sagen, wo sie sind

Nicht jedes Flugzeug strahlt eine Position aus. Ältere Transponder antworten dem Radar mit Kennung und Höhe, haben aber keine Satellitendaten; manche Flugzeuge senden bewusst keine. Doch ihre Aussendungen auf 1090 MHz erreichen trotzdem den Boden, und ein Netzwerk kann sie orten, indem es die Satellitennavigation umkehrt. Wenn vier Empfänger mit genau synchronisierten Uhren jeweils den Moment aufzeichnen, in dem dieselbe Aussendung eintrifft, verraten die Differenzen zwischen diesen Momenten die Entfernungsdifferenzen: Eine Nachricht, die Empfänger A eine Mikrosekunde vor Empfänger B erreicht hat, wurde von einem Punkt gesendet, der 300 m näher an A als an B liegt. Alle Punkte mit dieser Eigenschaft liegen auf einer gekrümmten Fläche, einem Hyperboloid, zwischen A und B. Drei solche Flächen, aus vier Empfängern, schneiden sich im Flugzeug. Das ist **Multilateration**, und sie verlangt eine Zeitgenauigkeit von etwa einer zehntel Mikrosekunde, 30 m, über Empfänger hinweg, die Hunderte Kilometer voneinander entfernt sind; die Empfänger beziehen diese Zeit von denselben Satelliten, die auch das Flugzeug nutzt.

Dieselbe Idee, zweimal

Satellitennavigation: ein Empfänger, vier Sender mit bekannter Position, gesucht ist der Empfänger.
Multilateration: ein Sender, vier Empfänger mit bekannter Position, gesucht ist der Sender. In beiden Fällen wird eigentlich die Zeit gemessen, und 1 Mikrosekunde sind 300 Meter.

KAPITEL 11

Wofür es genutzt wird und wo es an Grenzen stößt

Die Flugsicherung ist der erste Nutzer. In ganz Europa sehen Fluglotsen heute ein zusammengeführtes Bild, in dem ADS-B mit seinen Aktualisierungen zweimal pro Sekunde und seiner Genauigkeit auf Satellitenniveau mit Radar und Multilateration kombiniert wird; wo nie Radar hinreichte, über dem Nordatlantik, der Arktis, der Sahara und den meisten Ozeanen, werden ADS-B-Nachrichten von Empfängern auf Kommunikationssatelliten in niedriger Umlaufbahn aufgefangen, wodurch Flugzeuge auf dem Weg über den Atlantik weit dichter gestaffelt werden können als früher. Flugzeuge sind der zweite Nutzer: Ein Verkehrsflugzeug mit „ADS-B In“ zeigt seiner Besatzung den Verkehr in der Nähe an und speist ihn in das Kollisionswarnsystem ein. Flughäfen nutzen es, um Flugzeuge und Fahrzeuge am Boden bei Nebel zu verfolgen. Forschende nutzen die offenen Daten, um Lärm, Treibstoffverbrauch, Kondensstreifen und Verspätungen zu untersuchen. Und ein Empfänger auf einem Schuldach nimmt im Kleinen an alldem teil.

Die Schwächen des Systems ergeben sich unmittelbar aus seiner Konstruktion, und es lohnt sich, jede davon zu verstehen, statt sie bloß aufzuzählen. Weil die Nachrichten offen ausgestrahlt werden, weder verschlüsselt noch signiert, gibt es in einer Nachricht selbst nichts, was beweist, dass sie von einem Flugzeug stammt. Ein Sender am Boden könnte, illegal, eine perfekt aufgebaute Nachricht über ein Flugzeug ausstrahlen, das es gar nicht gibt, und ein Empfänger würde sie anstandslos decodieren. Was das System schützt, ist nicht die Nachricht, sondern ihr Umfeld: Ein Phantom erscheint nicht auf dem Radar, wird durch Multilateration nicht gefunden und verhält sich nicht wie echter Verkehr, und Kontrollzentralen gleichen ständig ab. Eine Version des Protokolls mit kryptografischen Signaturen wird seit vielen Jahren diskutiert; das Hindernis ist weniger technisch als praktisch, denn jeder Transponder der Welt müsste geändert werden.

Weil die Position vom Satellitenempfänger des Flugzeugs abhängt, stört alles, was die Satellitennavigation stört, auch ADS-B. Störsender (Jamming) und gefälschte Satellitensignale (Spoofing) sind in der Nähe von Konfliktgebieten alltäglich geworden, und ein Flugzeug, das ein solches Gebiet durchfliegt, kann womöglich keine Position berechnen oder berechnet eine falsche. Seine Nachrichten tragen dann eine herabgesetzte Integritätskategorie, das System des Lotsen markiert sie, und das Radar übernimmt, die unabhängige Messung, die ADS-B nie vollständig ersetzen sollte. Das Verhältnis der beiden ist also nicht das von Nachfolger und Vorgänger, sondern das von Partnern mit einander ergänzenden Schwächen.

Weil die Ausrüstungspflicht Verkehrsflugzeuge und die meisten größeren Flugzeuge umfasst, aber nicht alles, was fliegt, ist die Karte konstruktionsbedingt unvollständig. Leichtflugzeuge außerhalb des kontrollierten Luftraums, Segelflugzeuge, Ballone und viele Militärflugzeuge tragen womöglich gar kein ADS-B, und manche Leichtflugzeuge nutzen andere Systeme, die ein 1090-MHz-Empfänger nicht hört. Und weil die Ausstrahlung das Flugzeug identifiziert, kann sie auch seinen Eigentümer identifizieren: Einem bestimmten Privatjet zu folgen heißt im Grunde, einer bestimmten Person zu folgen. Das hat zu Programmen geführt, die das Kennzeichen von Flugzeugen verbergen, deren Eigentümer darum bitten, und zu einer anhaltenden Debatte darüber, ob Informationen, die ein Flugzeug der ganzen Welt mitteilt, zugleich privat sein können. Diese Debatte eignet sich gut für ältere Schüler, denn die Physik gibt darauf keine Antwort.

KAPITEL 12

Eine kurze Geschichte

1935 bis 1945

Das Primärradar wird in Großbritannien, Deutschland und den Vereinigten Staaten entwickelt; bei Kriegsende beantworten Freund-Feind-Kennungstransponder (IFF) Radarimpulse mit einer codierten Antwort, dem Vorläufer des Sekundärradars.

1950er- bis 1960er-Jahre

Das zivile Sekundärradar wird standardisiert: Abfragen auf 1030 MHz, Antworten auf 1090 MHz, Mode-A-Kenncodes und Mode-C-Höhe.

1980er-Jahre

Mode S mit eindeutigen 24-Bit-Adressen und Datennachrichten wird am MIT Lincoln Laboratory entwickelt und von der ICAO übernommen. GPS wird für zivile Nutzer einsatzbereit.

1990er- bis 2000er-Jahre

ADS-B wird definiert und erprobt, vor allem in Alaska, wo eine Radarabdeckung unmöglich und Unfälle häufig waren. Der 1090-MHz-Extended-Squitter wird international standardisiert.

2010er-Jahre

Billige softwaredefinierte Radios machen den Empfang zum Hobby; Freiwilligennetzwerke mit Tausenden von Empfängern entstehen. Für die Abdeckung der Ozeane werden Empfänger auf Satelliten ins All gebracht.

2020

ADS-B wird für die meisten Flugzeuge im kontrollierten Luftraum Pflicht, in den Vereinigten Staaten (Januar) und in der Europäischen Union (Juni, mit einer Übergangsfrist bis Jahresende). Der Himmel beginnt zu sprechen, überall und jederzeit.

Glossar

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast.
Flugzeuge strahlen ihre eigene Position aus.

Barometrische Höhe

Aus dem Luftdruck mithilfe einer Standardatmosphäre abgeleitete Höhe; die Höhe, die Flugzeuge melden.

CPR

Compact Position Reporting, das Verfahren mit geraden und ungeraden Nachrichten, das eine genaue Position in 34 Bit unterbringt.

CRC

Zyklische Redundanzprüfung, die 24-Bit-Fehlerprüfung am Ende jeder Nachricht.

Extended Squitter

Die spontane Mode-S-Aussendung von 112 Bit, die ADS-B trägt.

GNSS

Globales Navigationssatellitensystem: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

ICAO-Adresse

Die dauerhafte 24-Bit-Kennung des Transponders eines Flugzeugs.

Mode S

Der selektive Sekundärradar-Standard, auf dem ADS-B aufbaut.

Multilateration (MLAT)

Ortung eines Senders aus den Unterschieden der Ankunftszeit seines Signals an mehreren Empfängern.

Freiraumdämpfung

Die Abschwächung eines Signals mit der Entfernung nach dem Abstandsquadratgesetz.

Funkhorizont

Die größte Entfernung, bei der eine gerade Linie zwischen Antenne und Flugzeug die Erde nicht berührt.

SDR

Softwaredefiniertes Radio: ein Tuner, der rohe Signalabtastwerte zum Decodieren an einen Computer weitergibt.

SSR

Sekundärradar: Der Boden fragt ab, der Transponder antwortet.

Transponder

Das Funkgerät des Flugzeugs, das dem Radar antwortet und ADS-B auf 1090 MHz sendet.

Wellenlänge

Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Wellenbergen: c / f , 27,5 cm bei 1090 MHz.

ALS NÄCHSTES**Von der Theorie zur Praxis: den Empfänger bauen**

Zwölf Kapitel haben ein System erklärt, das Sie jetzt in der Hand halten können. Der Praxis-Workshop macht daraus die Arbeit eines Nachmittags: was Sie für 100 bis 150 Euro kaufen, wie Sie die Antenne aufbauen und platzieren, wie Sie einen Raspberry Pi vorbereiten und den Dataero-Feeder installieren und wie Sie zusehen, wie die Flugzeuge, die Sie empfangen, auf der Live-Karte erscheinen, Ihrer Station gutgeschrieben. Auf jedes Kapitel oben wartet dort eine Messung: der Funkhorizont an echten Flugzeugen, das Abstandsquadratgesetz in der Signalspalte, der Tagesrhythmus des Himmels.

Praxis-Workshop öffnen <https://radar.dataero.eu/de/learning/workshop>