

12 BIS 18 JAHRE - FÜR DIE LEHRKRAFT

Den Himmel entschlüsseln: Physik und Informatik an einem echten System

Fünf Unterrichtsstunden und ein Projekt. Jede Stunde nimmt sich einen Teil von ADS-B vor und entwickelt die zugrunde liegende Physik oder Informatik vollständig: Herleitungen, wo die Klasse ihnen folgen kann, durchgerechnete Beispiele mit echten Zahlen, Versuche, die die Idee beobachtbar machen, und die Stellen, an denen die Intuition der Schülerinnen und Schüler in die Irre führt. Die Jüngeren (12 bis 14) folgen den Ideen und der Rechnung; die Älteren (15 bis 18) folgen den Herleitungen und führen das Projekt durch.

Lernen - <https://radar.dataero.eu/de/learning/ages-12-18> 2026-10-22

INHALT

Bevor Sie beginnen: Warum ein echtes System fünf Stunden wert ist

STUNDE 1 - PHYSIK Wellen und das elektromagnetische Spektrum: worauf die Nachricht reist

STUNDE 2 - PHYSIK UND MATHEMATIK Zeit und Position: Wie das Flugzeug weiß, wo es ist, und wie ein Netz eines findet, das es nicht verrät

STUNDE 3 - INFORMATIK Die digitale Nachricht: 112 Bit, wie sie gesendet werden und wie Fehler erkannt werden

STUNDE 4 - PHYSIK Ausbreitung und Reichweite: die Erdkrümmung und das Abstandsquadratgesetz

STUNDE 5 - PHYSIK UND TECHNIK Antennen und Empfänger: von einer 27-Zentimeter-Welle zu einem Punkt auf der Karte

PROJEKT - ZWEI BIS VIER WOCHEN Einen Empfänger bauen und die Physik am Himmel überprüfen

Lösungen zu den Aufgaben der Schülerseite

ALS NÄCHSTES Das Projekt, Schritt für Schritt

Bevor Sie beginnen: Warum ein echtes System fünf Stunden wert ist

Die meiste Physik zwischen 12 und 18 wird in Einzelteilen unterrichtet: hier eine Einheit über Wellen, dort eine über das elektromagnetische Spektrum, ein Thema zu digitalen Daten in Informatik, eine Erwähnung von Satelliten in Erdkunde. ADS-B ist ein einziges funktionierendes System, in dem all diese Teile gleichzeitig tragend sind und dessen Ergebnis die Klasse mit einem Empfänger beobachten kann, der weniger kostet als ein Schulbuch. Ein Flugzeug bestimmt seine Position, indem es die Laufzeit von Funksignalen der Satelliten misst - das ist Trilateration und Lichtgeschwindigkeit. Es codiert das Ergebnis in 112 Bit mit einer zyklischen Redundanzprüfung - das ist Binärcodierung und Fehlererkennung. Es sendet die Bits als pulspositionsmodulierte Funkwelle auf 1090 MHz - das ist Spektrum, Frequenz und Wellenlänge. Die Welle erreicht einen Empfänger nur entlang einer geraden Linie, die über die Erdkrümmung hinwegreicht, und kommt mit dem Quadrat der Entfernung abgeschwächt an - das ist Geometrie und Energie. Eine abgestimmte Antenne von einer Viertelwellenlänge wandelt sie in einen Strom um - das ist Resonanz. Und ein Netz von Empfängern kann sogar einen schweigenden Sender

anhand von Laufzeitunterschieden orts - das ist das Satellitenproblem, umgekehrt betrachtet. Jede der folgenden Stunden greift eines dieser Themen auf und entwickelt es eigenständig, mit ADS-B als durchgehendem Beispiel und nicht als Dekoration.

Der Referenzkurs auf der Startseite stellt das ganze System erzählend dar; die Klasse sollte vor Stunde 3 dessen Kapitel 3 und 5 lesen und vor den Stunden 4 und 5 die Kapitel 6 bis 8; sein Glossar eignet sich gut als Arbeitsblatt. Diese Seite setzt voraus, dass Sie ihn gelesen haben, und konzentriert sich auf die Physik und den Unterricht. Die Zahlenkonventionen sind durchgehend einheitlich: $c = 3,00 \times 10^8$ m/s, $f = 1090$ MHz, Höhen in Metern, Entfernungen in Kilometern, und das Flugzeug im Reiseflug mit 11.000 m (Flughöhe 360) und 250 m/s, sofern das Beispiel nichts anderes angibt.

Zwei Warnungen zur Intuition. Schülerinnen und Schüler kommen mit der Vorstellung, Funkwellen seien eine Art Schall und „das Radar“ oder „die Satelliten“ würden die Flugzeuge sehen. Beides ist falsch, beides wird in den Stunden 1 und 2 ausdrücklich behandelt, und beides wird wiederkehren; der Kurs ist so angelegt, dass jede spätere Stunde Ihnen einen neuen Anlass gibt, es zu korrigieren. Außerdem kommen Lernende, die mit Formeln gut umgehen, oft nicht mit Größenordnungen zurecht: Der Kurs fragt deshalb bei jedem Schritt „Wie groß ist das?“, denn 300 m pro Mikrosekunde, 145 dB Streckendämpfung und 2^{24} Adressen sind genau die Art von Zahlen, durch die sich die Physik real anfühlt.

STUNDE 1 - PHYSIK

Wellen und das elektromagnetische Spektrum: worauf die Nachricht reist

Beginnen Sie mit der Beobachtung, auf der der ganze Kurs beruht: Die Funknachricht eines Flugzeugs und ein Lichtstrahl sind dasselbe physikalische Phänomen. Beide sind elektromagnetische Wellen, schwingende elektrische und magnetische Felder, die sich ohne jedes Medium durch den Raum ausbreiten, mit einer Geschwindigkeit c , die im Vakuum für jede Frequenz gleich ist und in Luft nahezu gleich: 299.792.458 m/s, was die Klasse als $3,00 \times 10^8$ m/s nehmen kann. Die einzige Größe, die Funk von sichtbarem Licht und sichtbares Licht von Röntgenstrahlung unterscheidet, ist die Frequenz f der Schwingung. Unsere Netzhaut reagiert auf Frequenzen zwischen etwa 4×10^{14} und 8×10^{14} Hz, die wir als Rot bis Violett wahrnehmen; ADS-B wird mit $1,09 \times 10^9$ Hz gesendet, rund eine halbe Million Mal niedriger. An der Welle selbst ist nichts grundsätzlich anders; nur unsere Augen sind wählerisch.

Leiten Sie die Wellengleichung mit der Klasse her, statt sie vorzugeben. Breitet sich eine Welle mit der Geschwindigkeit c aus und schwingt sie f -mal pro Sekunde, so ist sie in einer Sekunde um die Strecke c vorangekommen und hat f vollständige Schwingungen erzeugt; jede Schwingung nimmt also die Länge c / f ein. Diese Länge ist die Wellenlänge λ , und daher gilt $c = f \times \lambda$. Auf ADS-B angewandt: $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Die Nachricht zwischen Flugzeug und Empfänger hat Wellenberge im Abstand von 27,5 cm. Lassen Sie die Klasse diesen Wert in ein selbst gezeichnetes Spektrum auf logarithmischer Achse eintragen: UKW-Rundfunk bei 100 MHz und 3 m, ADS-B bei 1.090 MHz und 27,5 cm, Mobilfunk bei 1.800 MHz und 17 cm, WLAN und Mikrowellenherde bei 2.450 MHz und 12 cm, Infrarot, sichtbares Licht bei $5,6 \times 10^{14}$ Hz und 540 nm und so weiter bis zur Röntgenstrahlung. Die Welle des Flugzeugs zwischen Handy und Mikrowelle einzuordnen, ist mehr wert als jede Tabelle, weil es deutlich macht, dass es sich um Nachbarn handelt.

Gehen Sie nun die Verwechslung mit Schall direkt an, denn sie ist allgegenwärtig, und der Kontrast lehrt beide Phänomene. Schall ist eine longitudinale Druckwelle in einem Medium; seine Geschwindigkeit ist eine Eigenschaft des Mediums: 343 m/s in Luft bei 20 Grad, etwa 1.500 m/s in Wasser und null im Vakuum. Funk ist eine transversale elektromagnetische Welle, die überhaupt kein Medium braucht und sich im Vakuum mit c ausbreitet, in Luft unmerklich langsamer. Beziffern Sie den Unterschied: $3,00 \times 10^8$ geteilt durch 343 ergibt etwa 875.000. Ein Flugzeug in 30 km Entfernung, das im selben Augenblick ein Geräusch und eine Nachricht aussendet, liefert die Nachricht in 100 Mikrosekunden und das Geräusch in 87 Sekunden; bis das Geräusch ankommt, ist das Flugzeug 22 km weitergeflogen. Zur Veranschaulichung dienen ein Seil im Klassenzimmer und eine Taschenlampe über den Sportplatz hinweg: Eine Seilwelle braucht sichtbar das Seil und läuft mit einer Geschwindigkeit, die das Seil vorgibt, und der Lichtblitz erreicht das andere Ende ohne messbare Verzögerung. Zählen Sie ausdrücklich auf, was das Seil mit dem Licht gemeinsam hat (eine Welle, eine Wellenlänge, eine Frequenz, eine feste Geschwindigkeit und damit einen umgekehrten Zusammenhang zwischen f und λ) und was nicht (ein Medium, eine Geschwindigkeit von Metern pro Sekunde).

Schließen Sie mit der Polarisation, die sich leicht zeigen lässt und sich in Stunde 5 auszahlt. Das elektrische Feld einer elektromagnetischen Welle schwingt in einer bestimmten Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Transponderantennen von Flugzeugen stehen senkrecht, die ADS-B-Welle ist also vertikal polarisiert; auch eine Empfangsantenne muss senkrecht stehen, waagerecht gedreht empfängt sie fast nichts. Eine senkrecht geschüttelte Seilwelle passiert einen senkrechten Schlitz in einem Pappkarton und wird von einem waagerechten gestoppt; zwei gekreuzte Polarisationsfolien (aus einer billigen 3D-Brille) vor einem Fenster zeigen dasselbe für Licht. Lassen Sie die Klasse vorhersagen, was mit dem Empfang geschieht, wenn man eine Empfangsantenne flach hinlegt. Im Projekt wird diese Vorhersage überprüft.

Übungsaufgabe

Das zweite ADS-B-System, das in den Vereinigten Staaten von Kleinflugzeugen genutzt wird, sendet auf 978 MHz. Wie groß ist seine Wellenlänge, und wie lang wäre eine Viertelwellenantenne dafür? (0,307 m; 7,7 cm.) Wer das lösen kann, hat Stunde 1 verstanden.

STUNDE 2 - PHYSIK UND MATHEMATIK

Zeit und Position: Wie das Flugzeug weiß, wo es ist, und wie ein Netz eines findet, das es nicht verrät

Alles, was das Flugzeug über seine Position aussendet, stammt aus der Satellitennavigation, und Satellitennavigation ist im Kern eine Zeitmessung. Jeder GNSS-Satellit umkreist die Erde in etwa 20.200 km Höhe, trägt eine Atomuhr und sendet ein Signal, das seine eigene Position und den genauen Sendezeitpunkt angibt. Ein Empfänger registriert den Ankunftszeitpunkt. Die Differenz, multipliziert mit c , ist die Entfernung zu diesem Satelliten, und eine einzelne solche Entfernung legt den Empfänger auf eine Kugel mit diesem Radius um den Satelliten fest. Lassen Sie die Klasse die Anzahl herleiten: Zwei Kugeln schneiden sich in einem Kreis, drei in zwei Punkten, von denen einer weit von der Erdoberfläche entfernt liegt und verworfen werden kann. Drei Satelliten genügen also - vorausgesetzt, der Empfänger hat eine perfekte Uhr. Die hat er keineswegs; ein Quarzoszillator driftet weit mehr als um die geforderten Nanosekunden. Die Lösung, das elegante Herzstück des Themas, besteht darin, den Uhrenfehler des

Empfängers als vierte Unbekannte zu behandeln und einen vierten Satelliten zu nutzen: vier Gleichungen mit vier Unbekannten (x, y, z und Uhrenversatz), fortlaufend gelöst. Ein GNSS-Empfänger braucht daher vier Satelliten in Sicht und hält nebenbei die Zeit auf einige zehn Nanosekunden genau - weshalb die Empfänger im Netz aus Stunde 5 für ihre Uhren dieselben Satelliten nutzen wie die Flugzeuge.

Schreiben Sie die Größenordnungen an die Tafel und kommen Sie immer wieder darauf zurück. Licht legt in einer Nanosekunde 0,300 m zurück und in einer Mikrosekunde 300 m. Ein Zeitfehler von 1 Mikrosekunde ist ein Entfernungsfehler von 300 m; die Genauigkeit eines modernen Empfängers von wenigen Metern entspricht einer Zeitmessung auf etwa zehn Nanosekunden. Die Laufzeit von einem Satelliten direkt über uns beträgt $20.200 \text{ km} / 3,00 \times 10^5 \text{ km/s} = 0,0673 \text{ s}$, von einem nahe am Horizont etwa 0,086 s; der Empfänger misst also Unterschiede von wenigen Millisekunden mit einer Genauigkeit von einem Hundertmillionstel davon. Fragen Sie die Klasse, was geschähe, wenn die Uhr eines Satelliten eine Mikrosekunde vorginge; sie sollte erkennen, dass jeder Empfänger, der ihn nutzt, um etwa 300 m entlang der Linie zu ihm hin verschoben würde - und deshalb werden die Satellitenuhren mehrmals täglich vom Boden aus korrigiert.

Trennen Sie die beiden Höhen, denn die Nachricht enthält beide, und die Lernenden fragen immer danach. Die Satellitenlösung liefert eine geometrische Höhe über dem Referenzellipsoid der Erde. Flugzeuge melden dennoch die barometrische Höhe: den statischen Druck außerhalb des Rumpfes, umgerechnet in eine Höhe über die Internationale Standardatmosphäre (ISA), die auf Meereshöhe 1013,25 hPa und 15 Grad sowie eine Abnahme um 6,5 Grad pro Kilometer annimmt. An einem Tag, an dem der tatsächliche Druck vom Standard abweicht, ist die barometrische Höhe jedes Flugzeugs um denselben Betrag falsch - genau das, was die Staffelung braucht: Zwei Flugzeuge auf Flugfläche 350 und 360 sind unabhängig vom Wetter 1.000 ft voneinander entfernt. ADS-B-Positionsnachrichten enthalten die barometrische Höhe in 25-Fuß-Schritten; die Geschwindigkeitsnachricht enthält die Differenz zwischen barometrischer und geometrischer Höhe, sodass ein Empfänger beide ermitteln kann. Für die Älteren ist die ISA-Beziehung $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ eine gute Tabellenkalkulationsübung: Lösen Sie sie nach h auf und prüfen Sie, dass 11.000 m etwa 227 hPa entsprechen, einem Fünftel des Drucks auf Meereshöhe.

Drehen Sie das Problem nun um. Manche Flugzeuge senden auf 1090 MHz ohne Satellitenposition: ältere Transponder, die dem Radar nur Kennung und Höhe antworten, oder Flugzeuge, deren GNSS gestört wird. Ein Netz von Empfängern kann sie trotzdem orten. Angenommen, vier Empfänger mit synchronisierten Uhren erfassen den Ankunftszeitpunkt derselben Aussendung. Der Sender ist unbekannt, die Empfänger sind bekannt: Das ist das GNSS-Problem mit vertauschten Rollen von Bekanntem und Unbekanntem. Eine Nachricht, die bei Empfänger A eine Mikrosekunde früher ankam als bei Empfänger B, wurde von einem Punkt gesendet, der 300 m näher an A liegt als an B, und die Menge solcher Punkte ist ein Hyperboloid mit A und B als Brennpunkten. Drei unabhängige Paare aus vier Empfängern ergeben drei Hyperboloide, deren Schnittpunkt das Flugzeug ist. Das ist Multilateration, und sie verlangt, dass die Uhren der Empfänger auf etwa 100 ns übereinstimmen - was sie über die Satelliten erreichen. Reduzieren Sie es für die Klasse mit einer Übung auf dem Schulhof auf zwei Dimensionen: Drei Lernende mit Stoppuhren stehen an vermessenen Punkten, ein vierter klatscht irgendwo versteckt in die Hände, die drei notieren ihre um die Reaktionszeit korrigierten Verzögerungen, und die Klasse zeichnet die Hyperbeln (oder, einfacher, probiert Positionen auf einer maßstabsgetreuen Zeichnung aus), um den

Klatschenden zu finden, mit 343 m/s. Fragen Sie dann, welche Zeitgenauigkeit nötig wäre, um dasselbe mit Funk über 200 km zu tun, und lassen Sie die Klasse den Abstand zwischen einer Stoppuhr und einer Atomuhr spüren.

Übungsaufgabe

Zwei Empfänger in 60 km Abstand erfassen eine Nachricht mit 50 Mikrosekunden Zeitunterschied. Um wie viel näher am ersten Empfänger war das Flugzeug? (15 km.) Wenn die Uhren um 1 Mikrosekunde gegeneinander falsch gingen, welchen Fehler würde das im Ergebnis verursachen? (300 m.) Wer erklären kann, warum die zweite Antwort nicht von der Entfernung abhängt, hat verstanden, was Multilateration verlangt.

STUNDE 3 - INFORMATIK

Die digitale Nachricht: 112 Bit, wie sie gesendet werden und wie Fehler erkannt werden

Der Transponder des Flugzeugs sendet seine ADS-B-Daten als Mode S Extended Squitter: eine 8 Mikrosekunden lange Präambel, gefolgt von 112 Datenbits mit genau einem Bit pro Mikrosekunde. Beginnen Sie die Stunde mit der Präambel, denn sie beantwortet eine Frage, auf die die Lernenden noch nicht gekommen sind: Woher weiß ein Empfänger, dass eine Nachricht begonnen hat, wenn der Kanal voller Rauschen und anderer Flugzeuge ist? Die Präambel ist ein festes Muster aus vier Pulsen bei 0, 1, 3,5 und 4,5 Mikrosekunden. Ein Decoder sucht ständig nach diesem Muster; findet er es, weiß er sowohl, dass eine Nachricht folgt, als auch, wann genau jeder Bit-Slot beginnt. Jedes digitale Protokoll, das die Lernenden kennen, vom WLAN bis zum QR-Code, hat etwas Entsprechendes, und das ist ein guter Moment, darauf hinzuweisen.

Dann die Modulation. Ein Funksender kann ein- oder ausgeschaltet sein; wie sendet man eine 1 oder eine 0? ADS-B nutzt Pulspositionsmodulation (PPM): Jeder Bit-Slot von einer Mikrosekunde wird in zwei Hälften geteilt; ein Puls in der ersten Hälfte, gefolgt von Stille, bedeutet 1, Stille, gefolgt von einem Puls, bedeutet 0. Zeichnen Sie ein paar Bits als Pulse an die Tafel und lassen Sie die Klasse sie ablesen. Fragen Sie dann, warum das besser ist als das naheliegende Verfahren „Puls bedeutet 1, kein Puls bedeutet 0“. Mit etwas Anstoß ergeben sich zwei Gründe. Es gibt immer genau einen Puls pro Bit, sodass der Empfänger seinen Takt auch über eine Folge von Nullen hinweg halten kann, und er kann jedes Bit entscheiden, indem er fragt, welche Hälfte lauter war, statt ob ein Puls eine absolute Schwelle überschritten hat - das macht die Decodierung unempfindlich dagegen, wie stark das Signal gerade ist. Eine lange Folge von Nullen wäre im naiven Verfahren nicht von Stille zu unterscheiden; bei PPM ist sie ein gleichmäßiger Trommelschlag von Pulsen in der zweiten Hälfte.

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



Jeder Slot dauert 1 Mikrosekunde. Puls in der ersten Hälfte: 1. Puls in der zweiten Hälfte: 0.

Nun der Aufbau der 112 Bit, den die Klasse am Ende der Stunde aus dem Gedächtnis wiedergeben können sollte. Die Bits 1 bis 5 sind das Downlink-Format, 17 für ADS-B von einem Transponder. Die Bits 6 bis 8 sind ein Capability-Code. Die Bits 9 bis 32 sind die 24-Bit-ICAO-Adresse, die dauerhafte Kennung des Flugzeugs. Die Bits 33 bis 88 sind das 56-Bit-Nachrichtenfeld, dessen erste fünf Bits, der Typcode, angeben, was die übrigen 51 enthalten: Eine Identifikationsnachricht (Typcodes 1 bis 4) enthält das achtstellige Rufzeichen als acht 6-Bit-Zeichen; eine Luftposition (9 bis 18) enthält 12 Bit barometrische Höhe, ein Flag, ob es sich um einen geraden oder ungeraden Frame handelt, und je 17 Bit codierte Breite und Länge; eine Geschwindigkeitsnachricht (19) enthält die Ost-West- und Nord-Süd-Komponente der Geschwindigkeit über Grund, die Vertikalrate und die Differenz zwischen barometrischer und geometrischer Höhe. Die Bits 89 bis 112 sind die 24-Bit-Parität. Lassen Sie rechnen: 24 Adressbits ergeben $2^{24} = 16.777.216$ Flugzeuge; acht 6-Bit-Zeichen erlauben je 64 Symbole, genug für Buchstaben, Ziffern und Leerzeichen; 12 Bit Höhe in 25-Fuß-Schritten decken 102.400 Fuß ab; und 17 Bit Breite würden, naiv über 180 Grad verteilt, nur 1,4 km auflösen - was die Frage aufwirft, die Compact Position Reporting beantwortet. Erklären Sie CPR in einem Absatz: Die 17 Bit geben die Position innerhalb einer Zone auf wenige Meter genau an, aber nicht, welche Zone; das Flugzeug wechselt zwischen zwei Zonenrastern, gerade und ungerade, und ein Empfänger, der von jedem eines hat, kann die Zone eindeutig bestimmen und danach anhand einzelner Nachrichten verfolgen. Ein schönes Beispiel dafür, wie man mithilfe der Zeit aus denselben Bits mehr Genauigkeit gewinnt.

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

Geben Sie der Klasse eine echte Nachricht und lassen Sie sie zerlegen. Die Hexadezimalzeichenkette 8D4840D6202CC371C32CE0576098 hat 28 Hex-Ziffern, also 112 Bit. Die ersten beiden Ziffern, 8D, ergeben binär 10001 101: DF = 17, CA = 5. Die nächsten sechs Ziffern, 4840D6, sind die ICAO-Adresse, die laut Zuteilungstabellen den Niederlanden gehört. Die folgenden Ziffern, 20 ..., beginnen mit 00100, Typcode 4, einer Identifikationsnachricht, und die Decodierung der anschließenden 6-Bit-Zeichen ergibt das Rufzeichen KLM1023. Die letzten sechs Ziffern, 576098, sind die Parität. Eine Klasse mit einer Tabellenkalkulation oder ein paar Zeilen Python kann die gesamte Decodierung in einer Stunde erledigen, und das Ziel ist die Fähigkeit, eine Hex-Zeichenkette anzusehen und zu sagen: „Das ist ein KLM-Flugzeug, das seine Flugnummer meldet.“

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: Downlink-Format 17, Capability 5. 4840D6: ICAO-Adresse, den Niederlanden zugeteilt. 20...: Typcode 4, Identifikation, Rufzeichen KLM1023. 576098: die 24-Bit-Parität.

Schließen Sie mit der Parität, denn sie ist die Informatik-Idee, die sich am meisten zu vertiefen lohnt. Über einem verkehrsreichen Flughafen überlagern sich Nachrichten verschiedener Flugzeuge am Empfänger ständig, und Pulse gehen zudem im Rauschen verloren; ein Decoder wird zwangsläufig falsche Bits zusammensetzen. Das 24-Bit-Feld am Ende ist eine zyklische Redundanzprüfung (CRC): Die 88 Nachrichtenbits werden als lange Binärzahl behandelt und in einer besonderen Arithmetik, in der Subtraktion ein exklusives Oder ist, durch ein festes 25-Bit-Generatorpolynom geteilt; der Rest ist die

CRC. Der Empfänger wiederholt die Division mit den decodierten Bits und vergleicht. Jedes einzelne verfälschte Bit, jedes Paar verfälschter Bits und jedes Fehlerbündel bis zu 24 Bit Länge verändert den Rest, sodass die verfälschte Nachricht verworfen wird. Zeigen Sie die Idee im Kleinen mit einer 4-Bit-CRC auf einer 8-Bit-Nachricht von Hand oder mit dem einfacheren Gegenstück einer Prüfziffer im Strichcode; lassen Sie dann die Älteren die echte CRC-24 in ein paar Codezeilen umsetzen und prüfen, dass die Parität der Beispielnachricht stimmt und dass das Umkippen eines einzigen Bits die Prüfung scheitern lässt. Das ist Fehlererkennung, wie sie jedes moderne System betreibt, in einem Zusammenhang, in dem ein übersehener Fehler ein Phantomflugzeug auf den Bildschirm eines Fluglotsen bringen könnte.

Übungsaufgabe

Wie lange dauert eine vollständige Aussendung, und welchen Anteil der Zeit sendet ein Transponder ADS-B, wenn er 4,5 Extended Squitter pro Sekunde aussendet? (120 Mikrosekunden; 540 Mikrosekunden pro Sekunde, 0,054 Prozent.) Wie viele Flugzeuge könnten sich den Kanal im Prinzip teilen, bevor er ununterbrochen belegt wäre, wenn man alles andere, was darauf gesendet wird, außer Acht lässt? (Etwa 1.850 - weshalb die Überlastung im verkehrsreichsten Luftraum ein echtes technisches Problem ist.)

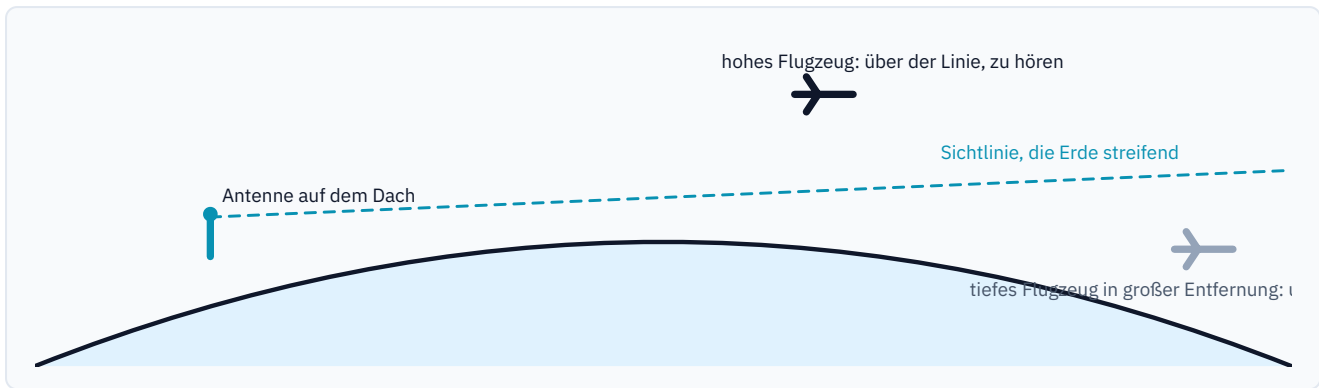
STUNDE 4 - PHYSIK

Ausbreitung und Reichweite: die Erdkrümmung und das Abstandsquadratgesetz

Wie weit entfernt kann ein Empfänger ein Flugzeug hören? Die Frage hat zwei voneinander unabhängige Antworten, eine geometrische und eine energetische, und Ziel der Stunde ist es, beide herzuleiten und festzustellen, dass die Konstrukteure dafür gesorgt haben, dass sie übereinstimmen. Zuerst die Geometrie. Bei 1090 MHz wird Funk nicht nennenswert um die Erde gebeugt; er verhält sich wie Licht und breitet sich geradlinig aus. Ein Empfänger kann daher nur Flugzeuge über seinem Horizont hören, also solche, bei denen eine gerade Linie zur Antenne nicht durch den Boden verläuft. Leiten Sie die Horizontentfernung mit der Klasse her. Eine Antenne in der Höhe h über einer Kugel mit Radius R sieht einen Horizont dort, wo ihre Sichtlinie die Kugel berührt. Die Tangente, der Radius zum Berührungspunkt und der Radius zur Antenne bilden am Berührungspunkt einen rechten Winkel, nach Pythagoras gilt also $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, woraus $d^2 = 2Rh + h^2$ folgt. Da h neben R winzig ist, gilt $d = \sqrt{2Rh}$. Mit $R = 6.371$ km und h in Metern ist d in Kilometern $= \sqrt{2 \times 6371 \times h / 1000} = 3,57 \sqrt{h}$. Die Dichte der Atmosphäre und damit ihre Brechzahl nimmt mit der Höhe ab, was Funkstrahlen leicht nach unten krümmt; die Standardkorrektur behandelt die Erde so, als hätte sie vier Drittel ihres wahren Radius, und ersetzt 3,57 durch 4,12. Die gesamte Sichtweite von einer Antenne in h_1 zu einem Flugzeug in h_2 ist die Summe der beiden Horizontentfernungen:

$$d \text{ (km)} = 4,12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \text{mit } h_1, h_2 \text{ in Metern}$$

Antenne auf einem 20-m-Dach, Flugzeug in 11.000 m: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ km. Gleiche Antenne, Flugzeug in 1.000 m: $4,12 \times (4,47 + 31,6) = 149$ km. Flugzeug auf der Startbahn in 30 km Entfernung: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, also nicht zu hören.



Lassen Sie die Klasse d gegen h_2 für die Antennenhöhe der eigenen Schule auftragen; die Kurve, anfangs steil und dann abflachend, erklärt die Form der Abdeckung jedes Empfängers: ein Kreis von 400 km und mehr für den Reiseflugverkehr, einige zehn Kilometer für Flugzeuge im Anflug und am Boden nichts außer am Flughafen nebenan. Sie erklärt auch, warum die Höhe wichtiger ist als jede andere Eigenschaft eines Empfängers und warum ein Hügel zwischen Ihnen und dem Flughafen oder die eigene Tragfläche des Flugzeugs, wenn es sich abwendend in die Kurve legt, eine Spur sofort abreißen lässt. Der Versuch auf dem Schulhof aus dem Grundschulkurs - von einer Bank aus weiter sehen als in der Hocke - ist für diese Altersgruppe nicht unter ihrem Niveau, wenn Sie die Herleitung folgen lassen; entscheidend ist, dass die Lernenden jetzt wissen, warum.

Nun die Energie. Ein Transponder strahlt eine Spitzenleistung von einigen hundert Watt ab, in allen horizontalen Richtungen ungefähr gleich. In der Entfernung d hat sich diese Leistung über eine Kugeloberfläche von $4 \pi d^2$ verteilt, die von einer Antenne mit fester Wirkfläche aufgefangene Leistung fällt also mit $1/d^2$: das Abstandsquadratgesetz, das die Klasse aus der Kugeloberfläche herleiten sollte, statt es auswendig zu lernen. Doppelte Entfernung, ein Viertel der Leistung; zehnfache Entfernung, ein Hundertstel. Funktechniker geben die Dämpfung zwischen einem isotropen Sender und einem isotropen Empfänger in Dezibel an, und die Standardformel, die die Älteren als gegeben hinnehmen oder aus der Wirkfläche einer Antenne, $\lambda^2 / 4 \pi$, herleiten können, lautet:

$$\text{Freiraumdämpfung (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ in km}) + 20 \log_{10}(f \text{ in MHz}) + 32,44$$

Bei 400 km und 1090 MHz: $20 \times 2,60 + 20 \times 3,04 + 32,44 = 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 \text{ dB}$. Ein 250-W-Sender hat +54 dBm; die Empfangsleistung beträgt $54 - 145 = -91 \text{ dBm}$, etwa $8 \times 10^{-13} \text{ W}$, also ein Millionstel eines Millionstels Watt.

Verwenden Sie ein paar Minuten auf Dezibel, falls die Klasse sie noch nicht kennt, denn sie verwandeln eine Multiplikation über vierzehn Größenordnungen in eine Addition, und weil die Zahl selbst aufschlussreich ist: Ein Empfänger auf dem Dach erfasst ein Signal, das $10^{14,5}$ -mal schwächer ist als das, welches das Flugzeug verlassen hat. Ein guter Hobbyempfänger kann bis etwa -100 dBm decodieren, bei 400 km bleiben also rund 9 dB Reserve - anders gesagt: Die energetische Grenze und der geometrische Horizont fallen für ein Verkehrsflugzeug im Reiseflug an dieselbe Stelle. Das ist kein Zufall; Transponderleistung und Empfängernormen wurden so festgelegt, dass ein Flugzeug bis zum Horizont und nicht viel weiter zu hören ist, damit der Kanal nicht von Aussendungen aus dem Nachbarland überflutet wird.

Zwei Vertiefungen für die Älteren. Erstens Doppler: Ein Flugzeug, das sich mit 250 m/s nähert, verschiebt die Empfangsfrequenz um $f \times v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz, weniger als ein Millionstel der Trägerfrequenz, was ein Empfänger nie bemerkt; vergleichen Sie das mit der hörbaren Dopplerverschiebung des Fluggeräuschs, bei der v / c gleich $250 / 343$ ist und sich die Tonhöhe beim Vorbeiflug um fast eine Oktave ändert. Zweitens die Signallaufzeit: 400 km mit c sind 1,33 ms, die Position in der Nachricht ist also bereits 1,33 ms alt, in denen sich das Flugzeug um 33 cm bewegt hat; vernachlässigbar für eine Karte, entscheidend für die Multilateration aus Stunde 2, die genau von diesen Mikrosekunden lebt.

Übungsaufgabe

Ein Empfänger auf einem 10-m-Mast hört ein Flugzeug im Reiseflug in 11.000 m, aber nicht ein Kleinflugzeug in 600 m Höhe in 130 km Entfernung. Liegt das Kleinflugzeug unter dem Horizont? (Horizont: $4,12 \times (3,16 + 24,5) = 114$ km, also ja.) Wie hoch müsste der Empfänger sein, um es zu hören? (Nötig ist $4,12 \times (\sqrt{h_1} + 24,5) = 130$, also $\sqrt{h_1} = 7,05$, $h_1 = 50$ m.)

STUNDE 5 - PHYSIK UND TECHNIK

Antennen und Empfänger: von einer 27-Zentimeter-Welle zu einem Punkt auf der Karte

Eine Antenne ist ein Leiter, in dem eine vorbeilaufende elektromagnetische Welle einen Wechselstrom induziert; Empfangs- und Sendeantenne sind dasselbe Bauteil, nur in entgegengesetzter Richtung betrieben - eine Reziprozität, die der Klasse ausdrücklich gesagt werden sollte. Der induzierte Strom ist am größten, wenn der Leiter in Resonanz ist: wenn seine Länge so bemessen ist, dass die Stromverteilung entlang des Leiters zur Schwingung der Welle passt, genau wie eine Saite der richtigen Länge bei einem bestimmten Ton mitschwingt oder eine Schaukel bei einem bestimmten Rhythmus des Anschubsens. Die Grundresonanz eines geraden Leiters liegt bei einer halben Wellenlänge, 13,75 cm bei 1090 MHz, mit dem größten Strom in der Mitte und null an den Enden. Die praktische ADS-B-Antenne, am Flugzeug wie bei den meisten Empfängern, ist ein Viertelwellen-Monopol: ein senkrecht Element von 6,9 cm auf einer leitenden Massefläche, die es elektrisch spiegelt, sodass Element und Spiegelbild zusammen den Halbwellendipol bilden. Am Flugzeug ist der Rumpf die Massefläche; eine gekaufte 1090-MHz-Antenne verbirgt dieselbe Geometrie in ihrem Rohr, mehrfach übereinander gestockt, um ihre Empfindlichkeit auf den Horizont zu bündeln. Ein im Unterricht gebautes Modell aus einem 6,9-cm-Stab auf einem Blechdeckel zeigt die Geometrie und die Länge, mit dem Lineal an der 27,5-cm-Welle nachgemessen; der Empfänger des Projekts verwendet jedoch die werkseitig abgestimmte Antenne, denn wenige Millimeter Abweichung verstimmen eine selbst gebaute, und sie empfängt nur einen Bruchteil des Himmels.

Entwickeln Sie das Strahlungsdiagramm, denn es sagt etwas voraus, das die Klasse beobachten kann. Ein senkrechter Monopol strahlt und empfängt am stärksten zum Horizont hin und überhaupt nicht entlang seiner eigenen Achse; seine Empfindlichkeit, dreidimensional dargestellt, ist ein Donut mit der Antenne im Loch. Ein Empfänger hört also typischerweise Flugzeuge in 300 km Entfernung einwandfrei und verliert eines, das direkt über ihn hinwegfliegt, für ein paar Sekunden - und die Klasse kann das an ihrem eigenen Empfänger beobachten. Eine Kollinearantenne, mehrere übereinandergesetzte resonante Elemente, drückt den Donut flacher und erhöht die Empfindlichkeit am Horizont, wo die fernen

Flugzeuge sind, auf Kosten des Lochs über der Antenne: Das ist Antennengewinn, angegeben in dBi, und er entsteht durch Umverteilung von Empfindlichkeit, nie durch deren Erzeugung. Die Polarisation aus Stunde 1 hat nun eine praktische Folge, die das Projekt überprüft: Die Antenne muss senkrecht stehen.

Zwischen Antenne und Computer liegen drei Stufen, jede eine kleine Lektion für sich. Ein Bandpassfilter lässt 1090 MHz durch und sperrt die weit stärkeren Mobilfunksignale einige hundert Megahertz daneben, die sonst den Verstärker übersteuern würden. Ein rauscharmer Verstärker (LNA), an der Antenne statt am Empfänger angebracht, vertausendfacht das Signal, bevor es ins Kabel gelangt; die Reihenfolge ist wichtig, denn ein Koaxialkabel verliert bei 1090 MHz etwa alle zehn Meter die Hälfte des Signals, 3 dB, und eine Verstärkung nach dem Verlust würde das Rauschen des Kabels mit dem Signal verstärken. Dann das Software Defined Radio: ein USB-Gerät für 20 Euro, ursprünglich als Fernsehtuner gebaut, das das Signal ins Basisband heruntermischt und zwei Millionen Mal pro Sekunde zu einem Zahlenstrom abtastet. Ab hier ist das Funkproblem ein Programmierproblem. Freie Software durchsucht den Abtaststrom nach dem Präambelmuster, misst, welche Hälfte jedes Mikrosekunden-Slots mehr Energie trägt, setzt 112 Bit zusammen, berechnet die CRC und decodiert, wenn sie stimmt, die Felder. Ein Tracker ordnet dann gerade und ungerade Positionsframes einander zu, führt Position, Geschwindigkeit und Identifikation über die ICAO-Adresse zusammen und hält den Zustand jedes Flugzeugs, bis keine Nachrichten mehr eintreffen.

Geben Sie der Klasse die Kette als Diagramm, das sie selbst zeichnet, mit der Größe auf jeder Stufe: Nanovolt Wechselspannung an der Antenne; Mikrovolt nach dem Verstärker; zwei Millionen 8-Bit-Zahlen pro Sekunde aus dem SDR; 112-Bit-Frames aus dem Decoder, vielleicht einige hundert pro Sekunde; ein Datensatz pro Flugzeug aus dem Tracker. Die Botschaft, auf die es ankommt: Ein Punkt auf einer Karte ist das ferne Ende einer Kette, in der jedes Glied eine Idee ist, die die Lernenden jetzt verstehen: Resonanz, Filterung, Verstärkung, Abtastung, Mustererkennung, Decodierung, Fehlerprüfung, Zusammenführung.

Übungsaufgabe

Ein Kabel verliert bei 1090 MHz 3 dB pro 10 m. Welchen Anteil des Signals verliert also eine 20-m-Leitung? (6 dB, drei Viertel.) Wenn die Grenze des Empfängers bei -100 dBm liegt und das Signal eines Flugzeugs in 400 km Entfernung an der Antenne -91 dBm beträgt, übersteht das Signal das Kabel ohne Verstärker? (Gerade so: -97 dBm. Jeder weitere Verlust, Regen an den Steckern oder eine längere Leitung, und das Flugzeug am Horizont verschwindet. Deshalb gehört der Verstärker an die Antenne.)

PROJEKT - ZWEI BIS VIER WOCHEN

Einen Empfänger bauen und die Physik am Himmel überprüfen

Das Projekt macht aus den fünf Stunden Messungen. Die Ausrüstung besteht aus einem USB-SDR-Dongle (etwa 25 Euro), einer werkseitig abgestimmten 1090-MHz-Antenne (50 bis 70 Euro), ein paar Metern Koaxialkabel und einem Laptop oder Raspberry Pi mit einem der freien Decoder (dump1090 und seine Nachfolger sind der Standard). Die Installation dauert einen Nachmittag, und die Software zeigt innerhalb von Minuten eine Tabelle der Flugzeuge mit ICAO-Adressen, Rufzeichen, Positionen, Höhen und Geschwindigkeiten sowie eine Karte. Im gesamten Projekt wird nur empfangen; nichts sendet, und die Klasse sollte verstehen, dass Senden auf Luftfahrtfrequenzen sowohl illegal als auch gefährlich wäre. Für den Zugang zum Dach braucht es die übliche Genehmigung der Schule; ein Fenster in einem oberen

Stockwerk in Richtung der Hauptverkehrsströme ist ein völlig ausreichender Anfang. Die Seite „Feeder werden“ auf dieser Website führt Schritt für Schritt durch dieselbe Installation und lässt den Empfänger der Schule Daten an die Live-Karte liefern.

Die erste Untersuchung gilt dem Funkhorizont. Der Decoder meldet für jedes Flugzeug Entfernung und Höhe, bei denen es zuletzt gehört wurde. Erfassen Sie über einen Tag die maximale Reichweite, in der Flugzeuge in mehreren Höhenbändern empfangen wurden, und tragen Sie die Reichweite gegen die Höhe auf. Die Lernenden haben die Formel aus Stunde 4 und die Antennenhöhe; sie sollten die Kurve vorhersagen, bevor sie die Daten sehen, und dann vergleichen. Die Übereinstimmung ist für hohe Flugzeuge meist gut und für tiefe schlechter, und die Diskussion über die Gründe (Gebäude, Gelände, das Loch der Antenne nach oben, die Abschattung durch das Flugzeug selbst) ist genau die Art von Konfrontation zwischen Theorie und Messung, die ein Schulbuch nicht bieten kann. Eine Karte der in jeder Richtung am weitesten entfernt gehörten Flugzeuge, die die Software zeichnet, zeigt das Gelände der ganzen Region als Schatten in der Abdeckung.

Die zweite gilt der Antenne. Vergleichen Sie Nachrichtenraten und maximale Reichweite mit der Antenne im Raum, am Fenster und auf dem Dach; senkrecht und waagrecht gelegt; auf einer Metallfläche stehend und von jedem Metall entfernt gehalten. Jeder Vergleich prüft eine bestimmte Aussage aus den Stunden 1 und 5, und jedes Ergebnis sollte vorher vorhergesagt werden. Am eindrucksvollsten ist der Polarisierungstest: Flach hingelegt verliert die Antenne die meisten ihrer Flugzeuge.

Die dritte gilt den Daten. Zeichnen Sie einen ganzen Tag Verkehr auf und stellen Sie Fragen daran: die verkehrsreichste Stunde, die Verteilung der Reiseflughöhen (die Lernenden erwarten eine breite Streuung und finden die meisten Verkehrsflugzeuge zwischen 10.000 und 12.000 m), die Steigrate der Abflüge vom nächstgelegenen Flughafen, die Staaten, deren Flugzeuge am häufigsten vorbeikommen (aus der Zuteilung der ICAO-Adressen). Die Älteren können Rohnachrichten aus dem von der Software protokollierten Hex selbst decodieren und die CRC mit eigenem Code prüfen. Eine Klasse mit einem zweiten Empfänger an einer Partnerschule in 30 oder mehr Kilometern Entfernung, beide mit GNSS-Zeitstempeln, kann eine zweidimensionale Multilateration eines Flugzeugs versuchen, das beide hören, und sie mit der vom Flugzeug gesendeten Position vergleichen: das ehrgeizigste Ergebnis des Kurses, und ein echtes.

Schließen Sie mit den Fragen, die das System aufwirft und nicht beantwortet. Die Nachrichten sind nicht signiert, ein Sender könnte also ein Phantomflugzeug aussenden; was schützt das System, und was würde eine signierte Version kosten? Das Flugzeug hängt von Satelliten ab, die gestört werden können; was geschieht mit dem Lagebild eines Fluglotsen, wenn das passiert? Die Daten identifizieren Flugzeuge, und ein Flugzeug kann eine Person identifizieren; wer sollte wen verfolgen dürfen? Eine Klasse, die den Empfänger gebaut hat, hat sich diese Fragen verdient, und sie eignen sich gut für einen abschließenden Aufsatz oder eine Debatte.

Lösungen zu den Aufgaben der Schülerseite

Die Schülerseite stellt acht Aufgaben, eine oder zwei pro Stunde, die als Hausaufgabe oder als Abschlusstest des Kurses genutzt werden können. Die Lösungen, mit der Begründung, die eine Antwort für die volle Punktzahl enthalten sollte:

1. Wellenlänge bei 1090 MHz: $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$.
Viertelwellenelement: 6,9 cm. Begründung: $c = f \times \lambda$; die feste Lichtgeschwindigkeit erzwingt einen umgekehrten Zusammenhang.
2. Licht ist um $3,00 \times 10^8 / 343$, also etwa 875.000-mal, schneller als Schall. Über 30 km braucht die Nachricht 100 Mikrosekunden und der Schall 87 s; das Flugzeug legt mit 250 m/s in dieser Zeit 22 km zurück.
3. Ein Uhrenfehler von 2 Mikrosekunden ergibt einen Entfernungsfehler von $2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 600 \text{ m}$. Vier Satelliten werden gebraucht, weil der Uhrenversatz des Empfängers neben x, y und z eine vierte Unbekannte ist.
4. $2^{24} = 16.777.216$ Adressen. Eine 112-Bit-Nachricht mit 1 Bit pro Mikrosekunde dauert 112 Mikrosekunden, mit der Präambel 120.
5. In 8D4840D6... ist 8D binär 10001101: Die ersten fünf Bits 10001 ergeben 17, also DF = 17, eine ADS-B-Nachricht von einem Mode-S-Transponder; die nächsten drei, 101, ergeben CA = 5. 4840D6 ist die ICAO-Adresse.
6. Funkhorizont von einer 15-m-Antenne zu einem Flugzeug in 9.000 m: $4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407 \text{ km}$.
Für ein Flugzeug in 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87 \text{ km}$.
7. Eine Verdoppelung der Entfernung viertelt die Empfangsleistung, weil sich dieselbe Sendeleistung über eine Kugel mit der vierfachen Fläche verteilt. Freiraumdämpfung bei 200 km und 1090 MHz: $20 \times 2,30 + 60,7 + 32,4 = 139 \text{ dB}$, 6 dB weniger als bei 400 km, im Einklang mit dem Faktor vier.
8. Eine waagrecht gelegte Antenne ist gegenüber der vertikal polarisierten Welle kreuzpolarisiert und empfängt sehr wenig; der induzierte Strom hängt von der Komponente des elektrischen Feldes entlang des Leiters ab. Ein Empfänger im Erdgeschoss verliert Reichweite, weil seine Horizontentfernung, $4,12 \times \sqrt{h_1}$, schrumpft und weil Gebäude die Sichtlinie versperren.

ALS NÄCHSTES

Das Projekt, Schritt für Schritt

Das Projekt aus Stunde 6 setzte einen Empfänger voraus; der Praxis-Workshop baut ihn. Er ist für jemanden geschrieben, der noch nie einen Raspberry Pi benutzt hat: die Einkaufsliste mit Preisen, die Wahl der Antenne, ihre Platzierung und die Kabeldämpfung, die Vorbereitung des Pi, die drei Befehle, die den Dataero-Feeder installieren, das Zuordnen der Station, das Einstellen der Verstärkung und fünf Messungen, eine pro Stunde, die die Physik am Himmel überprüfen. Eine Station, die Dataero beliefert, gibt der Klasse ein Dashboard, eine Abdeckungskarte und ein Jahr Verlaufsdaten zum Arbeiten.

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