LTEmobile.

KOSTENLOSE LESEPROBE

6G Mobilfunk verstehen

Vom Labor zum echten Netzbetrieb

Eike Gutt



Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

obwohl der Mobilfunk allgegenwärtig und eine der Schlüsseltechnologien unserer Zeit ist, läuft seine technische Weiterentwicklung meist relativ leise im Hintergrund ab und wird nur von einem kleinen Fachpublikum verfolgt. Das ändert sich eigentlich nur zu zwei Anlässen, bei denen die Presse gerne mit Superlativen um sich wirft: wenn bei einer Frequenzauktion Milliarden Euro für neue Frequenzen ausgegeben werden – oder wenn eine neue Mobilfunkgeneration vor der Tür steht, die unglaublich hohe Datenraten verspricht.

6G steht zwar noch nicht unmittelbar vor der Tür, aber die zentralen Entwicklungen zeichnen sich bereits klar ab. Das Ziel dieses Buches ist es, Ihnen einen fundierten Überblick über diese Entwicklungen zu verschaffen und dabei auch das nötige Grundlagenwissen verständlich zu vermitteln.

Auch wenn „6G" auf dem Titel steht, geht es in den meisten Kapiteln ebenso um allgemeine Mobilfunkthemen. Aus meiner Sicht lassen sich viele Neuerungen, die uns mit der sechsten Mobilfunkgeneration erwarten, erst mit diesem Fundament wirklich verstehen. Denn 6G wird nicht plötzlich als isolierte Technik auf der grünen Wiese ausgerollt, sondern knüpft nahtlos an viele Entwicklungen an, die schon mit der fünften Generation (5G) begonnen haben. Ein gutes Beispiel dafür ist die Bereitstellung von Mobilfunkdiensten über Satelliten – ein spannendes Thema, das uns in den kommenden Jahren zunehmend begleiten wird und dem im Buch ein eigenes Kapitel gewidmet ist.

Apropos Kapitel: Alle Kapitel sind so aufgebaut, dass sie sich unabhängig voneinander lesen lassen. Abkürzungen werden daher bewusst mehrfach ausgeschrieben und wichtige Institutionen kurz eingeordnet. Auch das Quellenverzeichnis befindet sich immer direkt am Ende des jeweiligen Kapitels. Ich habe diesen Weg gewählt, weil viele Leserinnen und Leser vermutlich eher gezielt einzelne Kapitel herausgreifen, die sie gerade interessieren, statt das Buch von der ersten bis zur letzten Seite am Stück durchzulesen. Wer doch alles in einem Durchgang liest, möge mir die gelegentlichen Wiederholungen nachsehen – aber einen Tod muss man bekanntlich sterben.

Ein Wort zur Transparenz: Was zunächst nur als kurzer Überblick zum Thema 6G gedacht war, hat schnell eine eigene Dynamik entwickelt und ist zu einem recht umfangreichen E-Book herangewachsen. Daran hat natürlich auch künstliche Intelligenz (KI) ihren Anteil: Ohne KI-Unterstützung wäre dieses Projekt in dieser Tiefe zeitlich kaum realisierbar gewesen. KI hat beim Erstellen der Grafiken geholfen, Texte redigiert, Fehler ausgemerzt sowie an der einen oder anderen Stelle inhaltlich unterstützt und bei der Quellenarbeit geholfen. Auch die Übersetzungen aus dem Deutschen wurden mit KI erstellt. Doch auch das Gespann aus Mensch und KI ist nicht unfehlbar – über Hinweise, Kritik und Feedback freue ich mich daher jederzeit!

Und nun wünsche ich Ihnen viel Spaß und spannende Aha-Momente beim Lesen!

Autor: Eike Gutt

Bremen, November 2026

Inhalt

Vorwort 3

Kapitel 1: Was 6G ist und warum daran gearbeitet wird 6

Kapitel 2: Grundlagen und Leistungskennzahlen 16

Kapitel 3: Anwendungen und ihr tatsächlicher Bedarf 36

Kapitel 4: Frequenzen und Regulierung 60

Kapitel 5: Funkschnittstelle und Antennentechnik 91

Kapitel 6: Netzarchitektur und Migration 124

Kapitel 7: Künstliche Intelligenz im Mobilfunk 151

Kapitel 8: Sensorik und Positionierung 175

Kapitel 9: Mobilfunk und Satelliten 199

Kapitel 10: Endgeräte, Energie und Nachhaltigkeit 227

Kapitel 11: Sicherheit, Datenschutz und Resilienz 254

Kapitel 12: Standardisierung und Zeitplan 284

Kapitel 13: Deutschland im internationalen 6G-Umfeld 311

Kapitel 14: Ausbau, Geschäftsmodelle und Ausblick 339

Abkürzungen zum Nachschlagen 362

Diese kostenlose Leseprobe enthält das vollständige Kapitel 8 einschließlich Quellen.
Das Inhaltsverzeichnis und die Seitenzahlen beziehen sich auf die Gesamtausgabe.

Kapitel 8: Sensorik und Positionierung

Die Technikerin aus den vorigen Kapiteln geht mit ihrer Datenbrille durch die Werkhalle. Hinter einer großen Maschine steht ein Transportwagen, den sie aus ihrer aktuellen Blickrichtung kaum sehen kann. Für das Funknetz verändert dieses Hindernis die Umgebung grundlegend: Funksignale werden abgeschattet, an massiven Metallflächen reflektiert und auf andere Wege gelenkt. Was die reine Datenübertragung spürbar erschwert, könnte im Umkehrschluss jedoch als wertvolle Informationsquelle dienen: Aus geeigneten Funkmessungen ließe sich möglicherweise präzise erkennen, dass dort im Raum ein Objekt steht oder sich bewegt.

Genau dieser faszinierende Gedanke steckt hinter **Integrated Sensing and Communication (ISAC)**, der integrierten Umfelderfassung und Kommunikation. Die Internationale Fernmeldeunion (ITU) koordiniert weltweit die Grundlagen der Telekommunikation; ihr zuständiger Funksektor (ITU-R) führt ISAC im offiziellen Rahmen für den künftigen Mobilfunk ausdrücklich als zentrales Nutzungsszenario auf. Vorgesehen sind darin unter anderem die automatische Erfassung, Ortung und Verfolgung von Objekten im Funkfeld. Dieser Rahmen beschreibt eine zukunftsweisende Entwicklungsrichtung – er macht aus heutigen Basisstationen jedoch noch längst keine flächendeckenden High-Tech-Radarsensoren. [1]

Dieses Kapitel erklärt Schritt für Schritt, welche physikalischen Informationen in Funksignalen stecken und wie daraus eine brauchbare Ortsangabe oder Umgebungsanalyse entstehen kann. Dabei begleiten uns stets zwei kritische Fragen: Was wird von der Technik tatsächlich gemessen, und wie zuverlässig lässt sich daraus auf die reale Umgebung schließen? Gerade im Bereich der Funk-Sensorik ist der schmale Grat zwischen einer faszinierenden Demonstration im Labor und einem im harten Fabrikalltag belastbaren Dienst entscheidend.

8.1 EIN NETZ KANN GERÄTE ORTEN UND OBJEKTE ERFASSEN

Der feine Unterschied zwischen Positionierung und Radarsensorik

Bei der herkömmlichen **Positionierung** eines Endgeräts wirkt das gesuchte Gerät selbst aktiv an der Messung mit. Unsere Datenbrille könnte beispielsweise bekannte Funksignale von mehreren Masten empfangen und Laufzeiten melden oder aktiv eigene Signale aussenden, die von mehreren Basisstationen ausgewertet werden. Gesucht wird in diesem Fall stets die exakte Position dieses aktiven Geräts. Ein achtlos abgestellter Transportwagen ohne eingebautes Funkmodul nimmt an einem solchen Kooperationsverfahren natürlich nicht teil.

Die radarartige **Umfelderfassung (Sensing)** setzt dagegen an einer völlig anderen Stelle an: Das von der Basisstation ausgesendete Funksignal trifft physisch auf den Transportwagen, und der Empfänger wertet die von dort zurückgeworfenen Echos aus. Das Zielobjekt muss für diesen Reflexionsvorgang weder in das Mobilfunknetz eingebucht sein noch selbst aktiv Funksignale aussenden. Beide Aufgaben – das Orten aktiver Endgeräte und das berührungslose Erfassen fremder Objekte – können im Netz zwar wunderbar zusammenwirken, bleiben aber grundlegend unterscheidbar. Eine Datenbrille zu lokalisieren oder einen fremden Gegenstand ohne Endgerät im Raum zu entdecken, verlangt völlig unterschiedliche physikalische Messungen und Auswerteverfahren. [2]

Auch der technische Grad dieser Integration kann in der Praxis stark variieren: Das *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)* unterscheidet in seinem ISAC-Gruppenbericht zwischen einer eher losen Kopplung bereits vorhandener Sensoren und Kommunikationstechnik einerseits und einer tiefen technischen Verschmelzung durch gemeinsam gestaltete Funksignale andererseits. Dazwischen liegen zahllose Abstufungen. Das Kürzel ISAC bedeutet deshalb keineswegs, dass künftig jedes einzelne übertragenen Datenpaket im Netz nebenbei auch gleich als perfekter Radarsensor dient. [2]

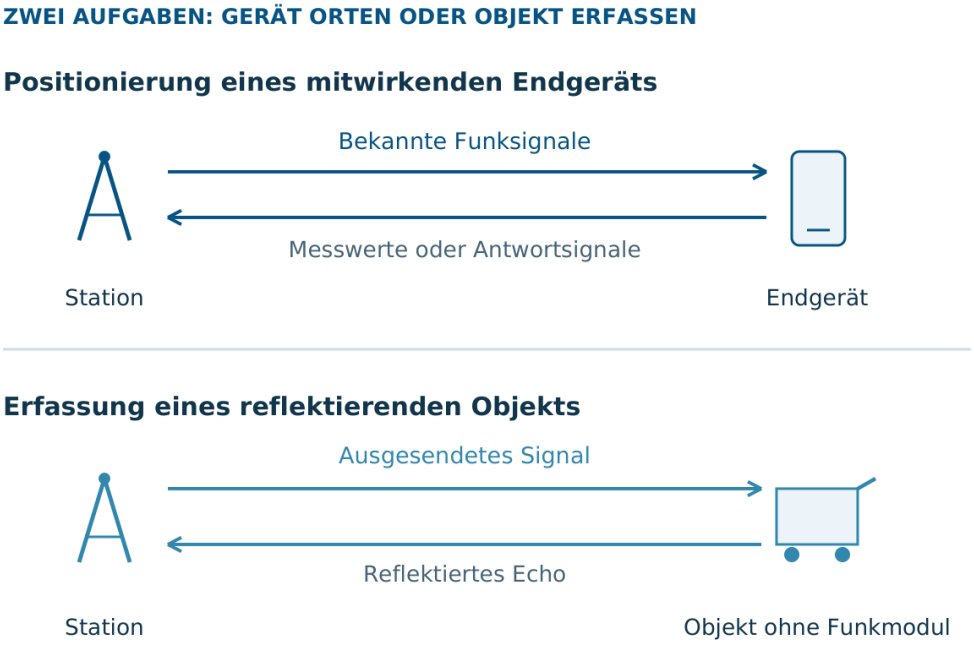

Abbildung 8.1: Oben wirkt ein Endgerät an seiner Positionierung mit. Unten liefert ein Objekt durch Reflexion ein Echo. Die Wege zeigen die unterschiedlichen Messaufgaben; sie sind keine maßstäbliche Darstellung und kein festgelegter 6G-Aufbau. Eigene Grafik nach [2, 9].

8.2 WAS EIN ECHO ÜBER SEINE UMGEBUNG VERRÄT

Laufzeit, Doppler-Verschiebung und Radarquerschnitt (RCS)

Das zugrundeliegende physikalische Prinzip ist vom alltäglichen Schallecho bestens vertraut: Ein ausgesendeter Impuls kehrt nach einer bestimmten Zeitspanne als Echo zurück. Bei Radar – ausgeschrieben *Radio Detection and Ranging* – übernehmen elektromagnetische Wellen diese Aufgabe. In der Luft breiten sie sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit aus. Befinden sich Sender und Empfänger exakt am selben Ort, legt das Echo den Weg zum Objekt und wieder zurück zurück. Aus der gemessenen Laufzeit lässt sich daher die Entfernung direkt berechnen. [3]

Ein einfaches Rechenbeispiel veranschaulicht die Dimensionen: Nehmen wir einen Transportwagen in exakt 30 Metern Entfernung an. Der Hin- und Rückweg summiert sich auf 60 Meter. Bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von rund 300 Millionen Metern pro Sekunde benötigt das Funksignal für diese Strecke gerade einmal 200 Nanosekunden – also 200 Milliardstel Sekunden. Diese winzigen Werte

erklären sofort, warum eine gewöhnliche Standuhr hier nicht ausreicht und warum moderne Verfahren hochpräzise Signalstrukturen auswerten müssen.

Jede Bewegung des Objekts verändert zusätzlich die empfangene Frequenz beziehungsweise den Verlauf der Signalphase (Doppler-Effekt). Diese Information verrät bei einem stationären Sender die radiale Bewegungskomponente auf die Station zu oder von ihr weg. Kommen mehrere Empfangsantennen hinzu, helfen Laufzeit- und Phasenunterschiede zwischen ihren Signalen bei der Bestimmung der exakten Einfallsrichtung. Laufzeit, Bewegung und Richtung greifen ineinander – doch keine dieser Größen liefert für sich allein bereits ein vollständiges räumliches Bild. [4, 5]

TECHNIK VERTIEFT

Die gemessene Geschwindigkeit hat eine Richtung

Für ein ruhendes, monostatisches Radarsystem gilt für die Dopplerverschiebung f_D in Abhängigkeit von der radialen Geschwindigkeit v_r und der Wellenlänge λ der klassische Betrag: $f_D = 2 \cdot v_r / \lambda$. Ein Objekt, das sich mit exakt 10 Metern pro Sekunde direkt auf die Antennenstation zubewegt, erzeugt bei einer Frequenz von 3,5 GHz eine Dopplerverschiebung von rund 233 Hertz; bei einer höheren Frequenz von 28 GHz sind es dagegen bereits rund 1.867 Hertz. Die physikalischen Werte folgen zwingend aus derselben Bewegung bei unterschiedlichen Wellenlängen. [4]

Bewegt sich der Transportwagen im beobachteten Moment exakt quer zur Sichtlinie (Tangentialbewegung), liegt seine radiale Geschwindigkeit bei nahezu null – obwohl er in Wirklichkeit fährt. Um seine vollständige Bewegungsrichtung im Raum zu erfassen, sind zwingend zusätzliche Beobachtungen aus anderen Blickwinkeln oder über die Zeit nötig. Eine pauschale Geschwindigkeitsangabe darf ohne Kenntnis der Messgeometrie niemals als vollständiger Bewegungsvektor missverstanden werden.

Auch die Stärke des zurückgeworfenen Echos erzählt nur einen Teil der Geschichte: Der sogenannte **Radarquerschnitt** (Radar Cross Section, RCS) beschreibt die effektive Rückstreuwirkung eines Objekts und entspricht

TECHNIK VERTIEFT · FORTSETZUNG

keineswegs einfach seiner sichtbaren physischen Fläche. Materialbeschaffenheit und komplexe geometrische Formen entscheiden darüber, wie viel Hochfrequenzenergie den Empfänger erreicht. Im idealisierten Freiraummodell sinkt die empfangene Echoleistung zudem mit der vierten Potenz der Entfernung (eine Verdopplung der Distanz lässt die Echoleistung auf ein Sechzehntel schrumpfen). Diese physikalische Realität macht unmissverständlich klar, warum eine noch so exzellente Datenverbindung keineswegs automatisch eine ebenso weit reichende, fehlerfreie Objekterfassung garantiert. [6]

8.3 WARUM DER STANDORT DES EMPFÄNGERS DIE RECHNUNG VERÄNDERT

Monostatische, bistatische und multistatische Anordnungen

Befinden sich Sender und Empfänger praktisch am selben Ort, spricht man von einer monostatischen Anordnung. Stehen sie räumlich getrennt voneinander, handelt es sich um eine bistatische (oder bei vielen Stationen *multistatische*) Erfassung. Das ETSI betrachtet in seinen Berichten sowohl feste Netzstationen als auch mobile Endgeräte in solchen Verbünden. Mehrere verteilte Standorte liefern zwar wertvolle unterschiedliche Blickwinkel auf eine Szene, treiben aber den Koordinations- und Rechenaufwand drastisch nach oben. [2]

In unserer Fabrik könnte beispielsweise eine Station an der Westwand senden und eine zweite an der Ostwand das Echo auffangen. Das Funksignal läuft in diesem Fall von Station A zum Wagen und von dort weiter zu Station B; gemessen wird folglich die gesamte Wegsumme. Eine einzelne solche Laufzeitmessung legt das Objekt geometrisch noch keineswegs auf einen Punkt fest: In der Ebene bilden alle Punkte, deren Summe der Abstände zu beiden Stationen denselben Wert ergibt, mathematisch eine Ellipse.

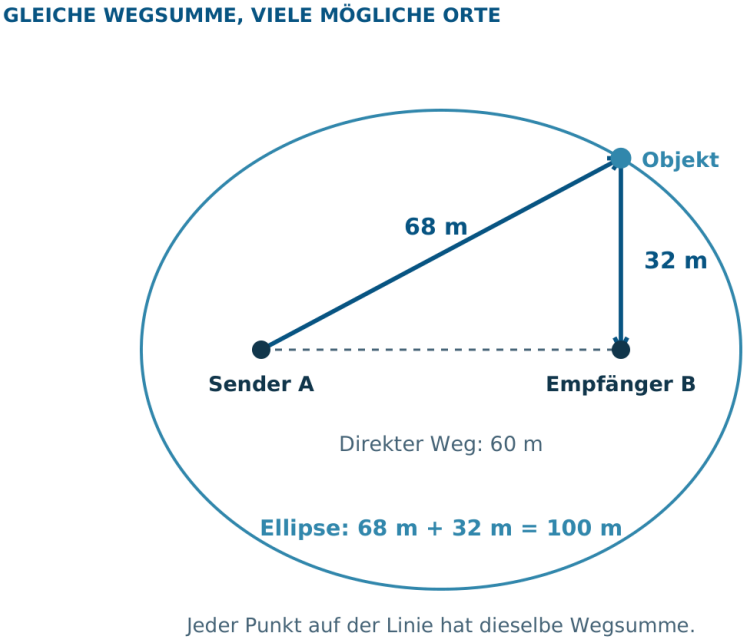

Abbildung 8.2: Eigenes geometrisches Beispiel mit 60 Metern Abstand zwischen Sender A und Empfänger B. Für den markierten Punkt sind die Teilwege 68 und 32 Meter lang; alle Punkte auf der Ellipse haben dieselbe Wegsumme von 100 Metern. Die Zeichnung ist in beiden Achsen gleich skaliert. Eine einzelne Wegsumme bestimmt den Ort noch nicht. Topologiebegriffe nach [2].

TECHNIK VERTIEFT

Wann die Laufzeit halbiert werden darf

Im einfachen monostatischen Fall (Sender und Empfänger sind eins) gilt für den Abstand $R = c \cdot \tau / 2$ (mit der Echo-Laufzeit τ und der Lichtgeschwindigkeit c). Im bistatischen Fall ergibt das Produkt $c \cdot \tau$ dagegen physikalisch die *Summe beider Teilwege* (Entfernung Sender-Objekt plus Objekt-Empfänger). Würde man diesen Gesamtwert von beispielsweise 100 Metern in einem bistatischen Aufbau fälschlicherweise einfach halbieren, erhielte man 50 Meter – ein Wert, der weder dem Abstand zum Sender (68 m) noch dem zum Empfänger (32 m) entspricht. Die einfache Halbierung funktioniert hier schlicht nicht.

TECHNIK VERTIEFT · FORTSETZUNG

Oft steht in der Praxis zudem nur der Zeitunterschied zwischen dem direkt ankommenden Signal und dem späten Echo zur Verfügung. In unserer geometrischen Skizze beträgt der direkte Weg 60 Meter, der Umweg über das Objekt 100 Meter; der gemessene Mehrweg beträgt folglich 40 Meter. Um daraus die volle Wegsumme zu berechnen, muss der bekannte direkte Stationsabstand exakt einbezogen werden. Diese geometrischen Gesetze gelten universell, völlig unabhängig davon, ob das Funksignal nach 5G- oder künftigen 6G-Regeln erzeugt wurde.

8.4 AUFLÖSEN UND GENAUIGKEIT BEANTWORTEN VERSCHIEDENE FRAGEN

Von Bandbreite, Pulskompression und Phasenschritten

Stellen wir uns zwei kleine Transportwagen dicht hintereinander auf derselben Sichtlinie vor: Kann das Funksystem beide Objekte als zwei getrennte Körper erkennen, besitzt es für diese Aufgabe eine ausreichende **Entfernungsauflösung**. Bei der **Genauigkeit** geht es dagegen um etwas anderes – nämlich darum, wie nah der berechnete Abstandswert am echten, physikalischen Messwert liegt. Ein System kann den exakten Abstand eines einzelnen, prominenten Objekts sehr genau schätzen und trotzdem völlig daran scheitern, zwei dicht benachbarte, verschmolzene Echos auseinanderzuhalten. Diese grundlegende Unterscheidung wird in technischen Radardokumentationen stets penibel gewahrt. [7]

Für die klassische Entfernungsauflösung ist vor allem die nutzbare **Signalbandbreite** entscheidend: Ein breiteres Frequenzspektrum erlaubt eine deutlich feinere zeitliche Trennung von Laufzeiten. Wichtig zur Wiederholung: Das ist keineswegs dasselbe wie eine höhere Trägerfrequenz. Ein Funksignal bei 28 GHz kann theoretisch schmal oder breit sein; Frequenzlage und Kanalbandbreite müssen immer sauber getrennt betrachtet werden. [8]

TRENNBARKEIT UND MESSABWEICHUNG

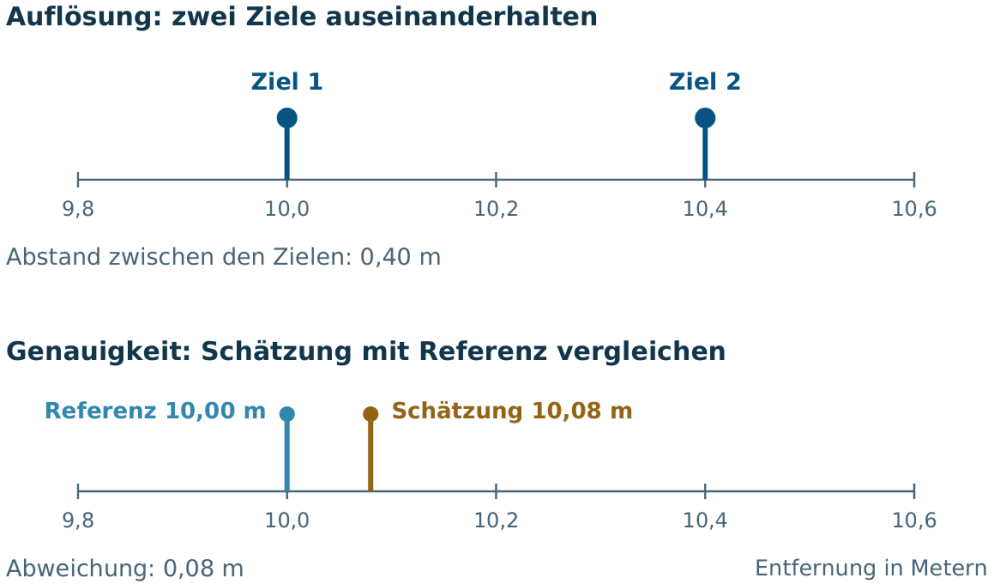

Abbildung 8.3: Eigene Veranschaulichung zweier Messfragen. Oben geht es um die Trennung von zwei Zielen, unten um die Abweichung einer einzelnen Abstandsschätzung vom Referenzwert. Die Zahlen sind frei gewählte Beispiele; die Markierungen zeigen keine simulierten oder gemessenen Echoverläufe. Begriffe nach [7].

TECHNIK VERTIEFT

Was die Bandbreite rechnerisch ermöglicht

Als klassische ingenieurtechnische Näherung für die monostatische Entfernungsauflösung ΔR gilt unter idealisierten Bedingungen: $\Delta R = c / (2 \cdot B)$ (wobei B die genutzte Signalbandbreite und c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet). Rechnen wir das durch:

Angenommene Bandbreite	Klassische Näherung für ΔR
100 Megahertz	1,50 Meter
400 Megahertz	0,375 Meter
1 Gigahertz	0,15 Meter

Eigene Rechnung mit $c \approx 300$ Mio. m/s im monostatischen Modell. Diese Werte sind weder garantierte Systemfehler noch starre Normvorgaben für 6G. [3, 8]

Eine Genauigkeitsangabe von wenigen Zentimetern bei schmalerer Bandbreite steht dazu nicht zwingend im Widerspruch: Für ein einzelnes, isoliertes Ziel können mathematische Schätzverfahren (Superauflösung) präziser arbeiten als die reine klassische Trennschärfe für zwei Ziele. Zudem lassen sich durch das Verfolgen kleiner Signalphasenänderungen feinste Bewegungen im Bruchteil einer Millisekunde erkennen – da ein voller Phasenumlauf jedoch bereits nach einer halben Wellenlänge erfolgt, bleibt die absolute Position ohne Zusatzinformation mehrdeutig. Eine präzise beobachtete kleine Bewegung ist daher nicht gleichbedeutend mit einer ebenso präzisen absoluten Position im Raum. [4, 5]

8.5 WIE DAS NETZ DIE POSITION EINES ENDGERÄTS BESTIMMT

Laufzeitdifferenzen, Rundlaufzeiten (Multi-RTT) und geometrische Mehrdeutigkeiten

Die Ortung verbundener, aktiver Geräte ist keineswegs eine Erfindung von 6G. Das 3GPP beschreibt in der Technischen Spezifikation *TS 38.305* (eingeführt ab Release 16) bereits eine Fülle robuster 5G-Verfahren:

Messprinzip	Welche Information es liefert
Laufzeitdifferenzen (TDOA)	Funksignale erreichen mehrere Messpunkte zu unterschiedlichen Zeiten; daraus lassen sich hyperbolische Abstandsdifferenzen ableiten.
Rundlaufzeiten (Multi-RTT)	Präzise Hin- und Rückmessungen liefern nach Abzug der Geräte-Antwortzeit direkte Entfernungsschätzungen zu mehreren Stationen.
Winkelmessungen (AoD / AoA)	Antennenfeld-Messungen schränken den Abstrahl- oder Einfallswinkel ein, aus dem das Signal kommt. [9]

Vereinfachte Einordnung der in TS 38.305 beschriebenen 5G-Verfahren, die in der Praxis oft intelligent kombiniert werden. [9]

Die geometrische Entstehung eines Standorts lässt sich mit idealen Abständen veranschaulichen: Alle Punkte mit demselben exakten Abstand zu einer Basisstation liegen in der Ebene auf einem Kreis. Zwei Kreise schneiden sich an zwei Punkten; erst eine dritte, passend positionierte Station löst diese Mehrdeutigkeit auf. In einer realen Fabrikhalle sind Messungen jedoch immer fehlerbehaftet, sodass aus den idealen Kreisen in der Auswertung unscharfe Wahrscheinlichkeitsbereiche werden. [9]

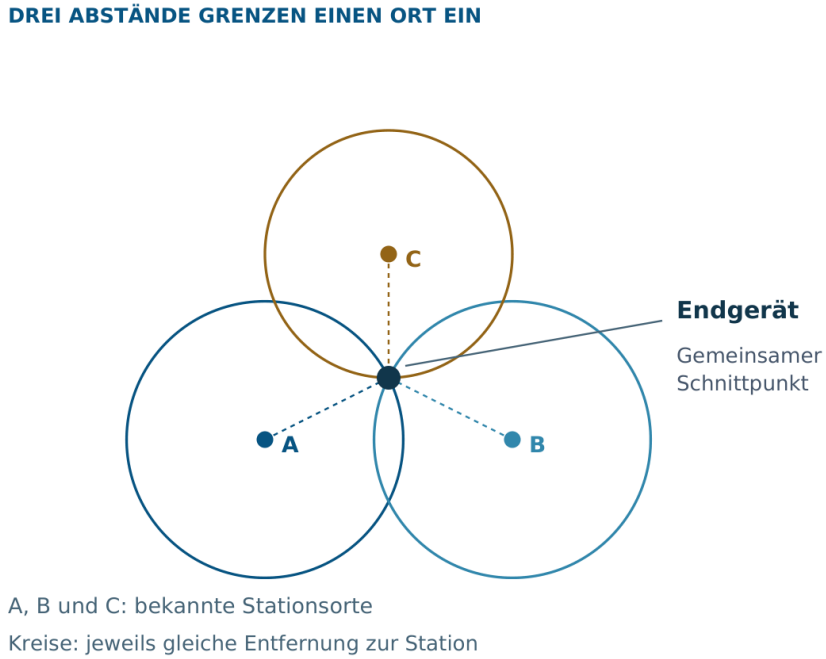

Abbildung 8.4: Eigene ebene Geometrie mit drei bekannten Stationsorten und idealen Entfernungsmessungen. Die Kreise schneiden sich am Endgerät. Das Beispiel setzt korrigierte Laufzeiten voraus; eine reale Messung besitzt Unsicherheit. Höhe, Uhrenfehler und andere Unbekannte können weitere Beobachtungen erfordern.

Eine ungünstige geometrische Anordnung lässt sich durch noch so viele Dezimalstellen in der Software nicht reparieren: Stehen alle beteiligten Stationen von der Brücke aus gesehen grob in derselben Richtung, können Ortsverschiebungen kaum verlässlich berechnet werden. Auch der Umweg über eine Reflexion an einer Maschine ist tückisch: Wird die längere Laufzeit fälschlicherweise als direkte Sichtverbindung interpretiert, erscheint das Gerät im Raum deutlich weiter entfernt, als es in Wahrheit ist. [9]

TECHNIK VERTIEFT

Warum eine Nanosekunde bereits viel ausmacht

Bei einer einfachen Einweg-Laufzeitmessung entspricht eine einzige Nanosekunde im Raum einem Weg von rund 30 Zentimetern. Verschiebt ein winziger, unbekannter Uhrenfehler in der Synchronisation die Messung um diesen Betrag, wirkt sich das unmittelbar als Entfernungsfehler aus. Im monostatischen Echo-Modus halbiert sich dieser Effekt zwar wegen des Hin- und Rückwegs, schlägt aber dennoch mit rund 15 Zentimetern zu Buche. [9]

Moderne Protokolle begegnen dem durch komplexe Uhrenfehler-Schätzungen, Differenzbildung oder kombinierte Rundlaufzeiten, bei denen Gerätereaktionszeiten sauber herausgerechnet werden müssen. Eine präzise Funkortung ist daher niemals eine naive Ping-Messung, deren Wert man nur noch mit einer Formel in Meter umrechnen darf. [9]

Im offiziellen 6G-Zielrahmen der ITU-R wird eine Positionierungsgenauigkeit von **1 bis 10 Zentimetern** als anspruchsvolles Forschungsziel für verbundene Geräte genannt. Diese Zahl ist jedoch weder ein Garantieschein für jeden Fabrikwinkel noch entspricht sie pauschal der physikalischen Auflösung einer radarartigen Umfelderfassung. Dafür führt der Rahmen völlig eigene Metriken ein, wie etwa Entfernungsauflösung, Erkennungs- und Fehlalarmraten. [1]

8.6 WIE KOMMUNIKATION UND MESSEN EIN SIGNAL TEILEN KÖNNEN

Die gemeinsame Nutzung von OFDM-Ressourcen für Daten und Radar

Die elegante Grundidee, Kommunikationssignale zugleich für Messaufgaben zu verwenden, ist deutlich älter als 6G. Beim allgegenwärtigen *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, das wir in Kapitel 5 kennengelernt haben, liegen Daten auf hunderten schmalen Unterträgern. Ein Sender kennt die von ihm exakt verschickten Modulationssymbole. Werden ihre Echos aus der Umgebung empfangen, kann eine clevere Empfängerverarbeitung den Einfluss dieser bekannten Daten herausrechnen und die verbleibenden Signalveränderungen durch Laufzeit und Bewegung auswerten. Wissenschaftler wie Braun, Fuhr und Jondral demonstrierten dieses Prinzip bereits im Jahr 2012 erfolgreich mit herkömmlichen WLAN-Signalen. [10]

Das erklärt den enormen Charme der Wiederverwendung: Ein einziges Funksignal transportiert Daten zur Datenbrille und „beleuchtet“ im selben Augenblick die Umgebung. Es beantwortet allerdings noch nicht, wie stabil das unter echter Last funktioniert: Ein Antennenstrahl zur Brille zeigt in eine bestimmte Richtung; für die gleichzeitige Suche nach unserem Transportwagen müsste eventuell ein völlig anderer Hallenbereich angestrahlt werden. Benötigte Sendezeitpunkte, Ausrichtungs-Richtungen und Bandbreiten können für Datenfunk und Radarsuche stark auseinanderdriften.

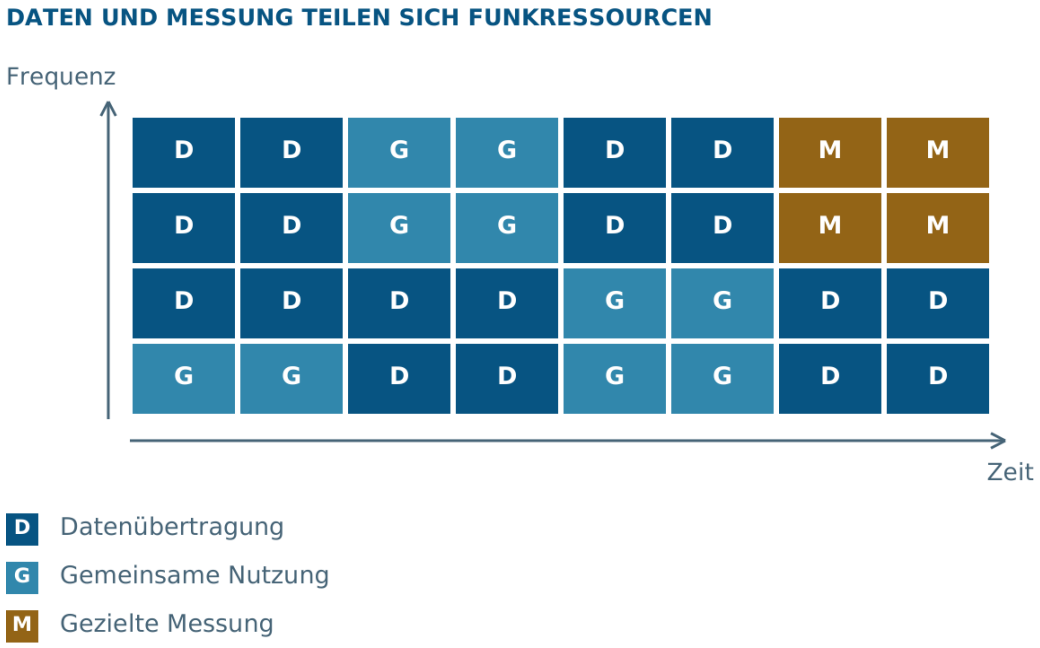

Abbildung 8.5: Eigene schematische Ressourcenbelegung. Einige Bereiche dienen der Datenübertragung, andere einer gezielten Messung; weitere können beide Aufgaben unterstützen. Die Felder bilden keine konkrete Funkrahmenstruktur ab und erlauben keine Aussage über eine prozentuale Kapazitätseinbuße. Grundidee gemeinsamer Signale: [10]; Abstimmungsbedarf: [11].

TECHNIK VERTIEFT

Warum ein Kommunikationssignal noch keinen fertigen Sensor ergibt

Bei der mathematischen Auswertung von OFDM-Echos zeigt sich eine Laufzeitverzögerung als kontinuierlicher Phasenverlauf über die Unterträger, während eine Dopplerverschiebung als zeitliche Veränderung über aufeinanderfolgende Symbole sichtbar wird. Damit beide Effekte im Empfänger sauber voneinander getrennt geschätzt werden können, müssen Signalparameter, Messdauer und Rechenschritte perfekt ineinandergreifen. [10]

TECHNIK VERTIEFT · FORTSETZUNG

Hinzu kommt eine gewaltige praktische Hürde: Ein stark sendender Funkknoten droht seinen eigenen, sensiblen Empfänger im selben Gehäuse zu übersteuern, während er nach winzigen Echos lauscht (Self-Interference). Auch benachbarte Masten können sich bei der Radarsuche gegenseitig stören. Der ETSI-Architekturbericht widmet sich aus gutem Grund intensiv Fragen wie der passenden Signalformung, der Echokompensation und der gemeinsamen Ressourcen-Zuteilung. Die Mitnutzung vorhandener Infrastruktur spart zwar Materialaufwand, verlangt aber nach exzellenter Empfangstechnik und enormer Rechenleistung. [11]

8.7 VOM EMPFANGENEN SIGNAL ZUR VERSTÄNDLICHEN AUSSAGE

Von Rohdaten über Objekterkennung zur Sensorfusion

Die Fabriksteuerung kann mit einer rohen Liste von Funkechowern und Dezibel-Werten allein wenig anfangen. Sie benötigt verlässliche Aussagen wie: *„Der Durchgang an Presse 3 ist aktuell frei“* und *„Wie alt ist diese Information?“*. Dazwischen liegt eine mehrstufige Datenverarbeitung: Das System gewinnt zunächst physikalische Messgrößen, filtert daraus plausible Objekte und verknüpft aufeinanderfolgende Beobachtungen zu zusammenhängenden Bewegungspfaden (Tracking). Erst ganz am Ende leitet die Anwendung daraus eine praxisnahe Handlungsanweisung ab.

Die 3GPP-Spezifikation *TS 22.137* unterscheidet hierbei konsequent zwischen rohen *Sensing-Daten* und bereits verarbeiteten *Sensing-Ergebnissen*, ergänzt um nützlichen Kontext wie elektronische Karten und exakte Zeitstempel. Für unser Beispiel ist das essenziell: Eine Ortskoordinate ohne gültigen Zeitstempel nützt der Steuerung wenig, wenn der Transportwagen in der Zwischenzeit längst weitergerollt ist. [12]



Abbildung 8.6: Eigener vereinfachter Ablauf für die Hallenbeobachtung. Ein Messwert wird erst durch Auswertung und Zuordnung zu einer Aussage für die Anwendung. Zusätzliche Sensoren oder Karten können dabei helfen, müssen aber zeitlich und räumlich zu den Funkmessungen passen. Keine verbindliche 6G-Architektur; Begriffsgrundlage: [12].

Ein einzelner Reflexionspunkt muss zudem erst mühsam als Teil eines echten physischen Objekts erkannt werden. Ein komplexer Wagen wirft oft Dutzende Echos gleichzeitig zurück; ein einzelnes Echo verrät nicht automatisch, ob es von einer Metallkante, einem Regal oder einer Person stammt. Künstliche Intelligenz (KI) kann bei dieser Objekterkennung unterstützen, unterliegt jedoch wieder den aus Kapitel 7 bekannten Grenzen: Die Zuordnung muss auch bei veränderten Licht- und Raumverhältnissen verlässlich funktionieren.

Beim Zusammenführen mehrerer Sensoren (**Sensorfusion**) liefert beispielsweise eine optische Überwachungskamera Hinweise auf die Objektart, während das Funksystem die exakte Bewegung beisteuert. In unserer Fabrik müssen beide Quellen absolut synchron denselben Wagen meinen: Schon ein minimal verschobener Zeitstempel oder ein leicht verdrehtes Koordinatensystem erzeugt ein verlockend aussehendes, aber völlig falsches Gesamtbild. Für einen echten digitalen Zwilling der Halle ist es deshalb lebenswichtig, veraltete oder unsichere Zustände transparent als solche zu kennzeichnen.

8.8 WIE AKTUELL UND VERLÄSSLICH EIN ERGEBNIS SEIN MUSS

Ein Blick auf Latenz, Aktualisierungsrate und statistische Fallstricke

Eine exakte Position zum falschen Zeitpunkt ist in einer dynamischen Umgebung wertlos. Nehmen wir an, unser Transportwagen fährt gleichmäßig mit einer Geschwindigkeit von zwei Metern pro Sekunde. Vergehen zwischen der eigentlichen Funkmessung und der Bereitstellung des ausgewerteten Ergebnisses gerade einmal 200 Millisekunden, hat sich der Wagen in dieser kurzen Spanne bereits um 40 Zentimeter weiterbewegt. Ein auf fünf Zentimeter genauer Messwert beschreibt dann mathematisch nur noch die Vergangenheit. Eine Vorhersage kann das zwar ausgleichen, bringt aber wiederum eigene Schätzfehler mit sich.

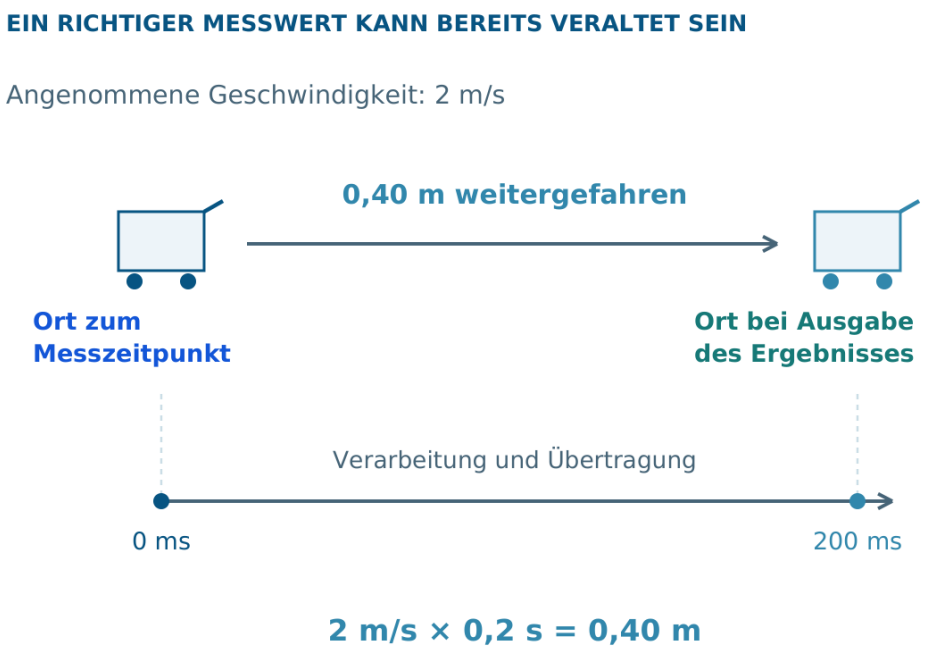

Abbildung 8.7: Eigene Rechnung bei angenommener, gleichförmiger Bewegung. Während die Messung verarbeitet und übertragen wird, fährt der Wagen 0,40 Meter weiter. Der Zeitstempel gehört deshalb zur Ortsangabe. Die 200 Millisekunden sind ein gewählter Beispielwert und keine Vorgabe für 6G.

Auch die *Aktualisierungsrate* (wie oft pro Sekunde ein Wert geliefert wird) ist strikt von dieser Verarbeitungsverzögerung zu unterscheiden: Alle 100 Millisekunden ein neues Messergebnis auszuspucken, verkürzt die feste Rechen- und Übertragungsverzögerung von 200 Millisekunden keinen Millisekunden lang – man

erhält schlicht in kürzeren Abständen eine jeweils leicht veraltete Beobachtung. Die Leistungsanforderungen in TS 22.137 führen Erneuerungsintervall, Verzögerung, Genauigkeit und Erkennungsfehler deshalb zu Recht als völlig unterschiedliche Metriken auf. [12]

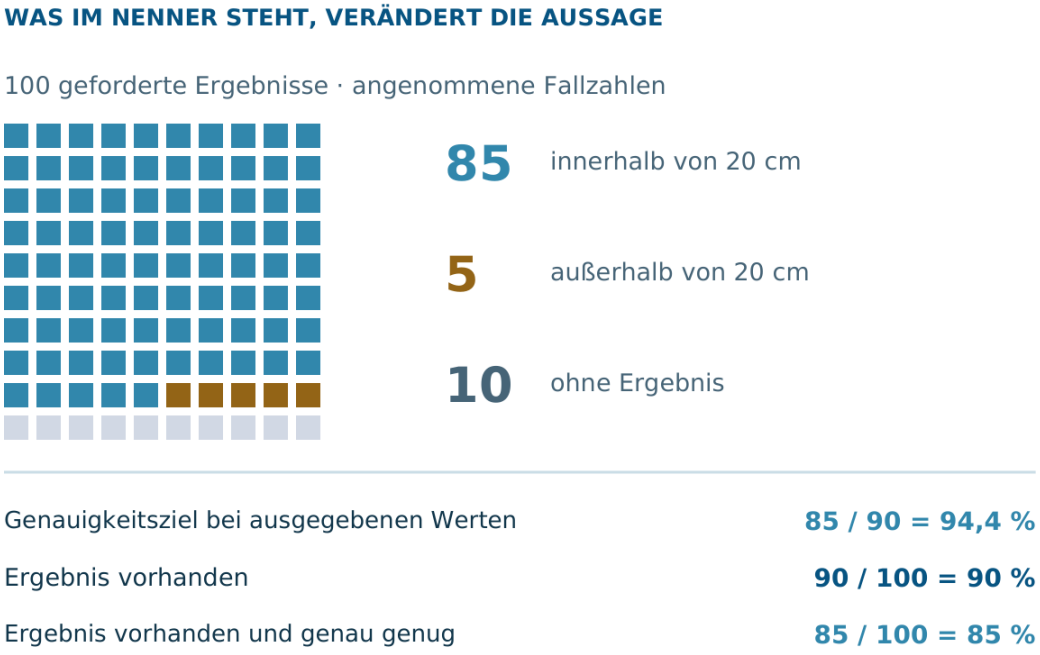

Abbildung 8.8: Eignes Prüfbeispiel mit 100 geforderten Ergebnissen: 85 erfüllen die Genauigkeit, fünf verfehlen sie, zehn fehlen. Die Kennzahlen haben verschiedene Nenner. Die Fallzahlen sind angenommen, keine Messdaten.

Für den Hallenversuch bedeutet das: Es muss vorab exakt definiert werden, welche Objekte unter welchen Bedingungen erkannt werden sollen. Getrennt voneinander zu prüfen sind ein freier Weg, ein blockierter Weg, wechselnde Beladung und verdeckte Sichtlinien. Ein Fehlalarm stoppt die Produktion unnötig; ein übersehenes Hindernis ruft schwere Schäden hervor. Ein simpler mathematischer Mittelwert verschleiert solche kritischen Details. Vor einem sicherheitsrelevanten Echtzeit-Einsatz braucht es deshalb einen ausgedehnten Probebetrieb, in dem die Funk-Sensorik gegen eine unabhängige Referenz gemessen wird.

8.9 WAS IM OKTOBER 2026 BEREITS BESCHRIEBEN IST

Standardisierungsstand: 5G-Sensing, TR 38.765 und ITU-R M.2160

Ein Blick auf den aktuellen Standardisierungsstand zeigt eine saubere Staffelung über mehrere Ebenen hinweg:

Dokument	Einordnung für den Leser
ITU-R M.2160	Offizieller globaler Zielrahmen für IMT-2030 (6G-Entwicklung).
3GPP TS 22.137	Normative Anforderungen an einen 5G-Sensing-Dienst (betrachtete Ausgabe: Release 19).
3GPP TR 38.765	Technischer Studienbericht zu ISAC für New Radio (NR) in Release 20.
ETSI GR ISC 003	Gruppenbericht zu möglichen System- und Funkzugangsarchitekturen für ISAC. [1, 11–15]

Redaktionsstand 26. Oktober 2026. Ein übergeordneter Zielrahmen, eine konkrete Anforderungsspezifikation und ein technischer Studienbericht haben im Entwicklungsprozess eine völlig unterschiedliche rechtliche und praktische Aussagekraft. [1, 11–15]

8.10 WORAN IN DEUTSCHLAND KONKRET GEARBEITET WIRD

Forschungsprojekte wie SENSATION und universitäre Testbeds

Dass diese Fragen keine graue Theorie sind, belegen aktuelle deutsche Forschungsarbeiten. Am *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* untersucht das Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik (IHE) im Projekt **SENSATION** (Laufzeit Januar 2026 bis Dezember 2028) ganz praktisch den Übergang von der ISAC-Forschung zu industriellen Anwendungen wie Drohnenerfassung und Intralogistik. Das Institut prüft dort hochentwickelte Signalverarbeitung und Systemansätze mit realen Messungen in dynamischen Szenarien. [16]

Ein weiteres spannendes Beispiel liefert eine Forschungsarbeit von Gu und Mitautoren an der *Technischen Universität München (TUM)* aus dem Jahr 2025. Sie beschreibt ein experimentelles Testbed mit 5G-Millimeterwellen-Hardware und einer momentanen Signalbandbreite von bis zu 4 Gigahertz, realisiert durch das Zusammenschalten mehrerer Träger. Das verdeutlicht die enorme experimentelle Leistung, die für hochauflösende Sensorik nötig ist – stellt jedoch einen spezialisierten Laboraufbau dar, aus dem sich natürlich noch keine entsprechende Serienausstattung künftiger Smartphones ableiten lässt. [17]

8.11 WARUM SENSORIK AUCH OHNE KAMERA PRIVATSPHÄRE BERÜHRT

Datenschutz, Personenbezug und die DSGVO

Ein autarkes Funksystem kann detaillierte Informationen über menschliche Bewegungen im Raum gewinnen, ohne jemals ein einziges optisches Foto oder Video aufzuzeichnen. Dennoch greift eine solche flächendeckende Erfassung tief in die Privatsphäre ein, weil Aufenthaltsorte und Bewegungsprofile hochsensibel sein können. Besonders kritisch ist, dass eine radarartige Umfelderfassung prinzipiell auch Personen betrifft, die gar kein elektronisches Endgerät bei sich tragen und folglich auch keinerlei digitale Einwilligung erteilen konnten. Das ETSI widmet diesem Sicherheitsaspekt in seinem Bericht *GR ISC 004* ein eigenes Kapitel. [18]

Für den Betrieb in Deutschland und der EU greift beim Verarbeiten solcher Daten uneingeschränkt die **Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO)**, sobald sich die gewonnenen Bewegungsinformationen auf identifizierte oder identifizierbare natürliche Personen beziehen (Artikel 4 nennt ausdrücklich auch Standortdaten). Artikel 5 fordert strikte Zweckbindung, Datenminimierung und eine zeitlich begrenzte Speicherung. Die Tatsache, dass eine Raumerfassung unsichtbar über Funkwellen statt über Kameras erfolgt, ändert rein rechtlich absolut gar nichts daran, ob personenbezogene Daten berührt werden. [19]

8.12 WELCHEN NUTZEN DIE ZUSÄTZLICHE WAHRNEHMUNG BRINGEN KÖNNTE

Fazit: Wenn das Netz seine Umwelt begreift

Kehren wir zum Abschluss noch einmal zu unserer Servicetechnikerin in der Fabrikhalle zurück: Der echte, greifbare Nutzen einer integrierten Sensorik bestünde schlicht darin, verlässlich und rechtzeitig zu erfahren, ob ein Arbeitsbereich frei oder blockiert ist. Ob diese Information aus hochentwickelten Funkechos, einer intelligenten Kamera oder einer cleveren Kombination beider Quellen gewonnen wird, muss sich einzig an den harten Anforderungen der Anwendung messen lassen. ISAC wird vor allem dann triumphieren, wenn bereits vorhandene Mobilfunkmasten ohne unbezahlbaren Zusatzaufwand einen wertvollen zweiten Blick auf die Abläufe im Raum ermöglichen.

Gleichzeitig schließt sich hier der Kreis zu Kapitel 7: Eine zusätzliche physikalische Beobachtung kann eine KI-gestützte Lastprognose im Netz füttern und verbessern, ersetzt jedoch niemals die saubere Überprüfung der tatsächlichen Übertragungsverbindung. Ein digitaler Zwilling unserer Fabrik profitiert massiv von solch sekundenschnellen Live-Daten – bleibt aber immer ein fehleranfälliges Modell, das mit echten physikalischen Unsicherheiten umgehen muss.

Der potenzielle Quantensprung von 6G liegt in dieser engen, intelligenten Verschmelzung von klassischer Kommunikation, hochpräziser Messung und dezentraler Datenverarbeitung. Im nächsten Kapitel weiten wir den Blick nun endgültig über den Horizont hinaus und betrachten den Mobilfunk im Zusammenspiel mit der Satellitentechnik (Kapitel 9).

QUELLEN ZU KAPITEL 8

Belege und Lesespuren

Die Nummern im Text verweisen auf die folgenden Primärquellen. Die verlinkten Titel führen zum jeweiligen Original. Abruf und Einordnung: 26. Oktober 2026. Grafiken und ausdrücklich gekennzeichnete Rechenbeispiele wurden für dieses Kapitel erstellt; sie sind keine Messungen realer Netze.

[1] ITU-R M.2160-0 - Framework for IMT for 2030 and beyond

November 2023. Anhang Abschnitt 3 zum Nutzungsszenario ISAC und Abschnitt 4 zu Positionierung und Sensing, insbesondere gedruckte Seite 16. Verabschiedeter Zielrahmen; die 1–10 Zentimeter sind ein mögliches Forschungsziel für die Positionierung verbundener Geräte.

[2] ETSI GR ISC 001 - Use Cases and Deployment Scenarios

Version 1.1.1, März 2025. Abschnitte 4.1–4.3 zu Messanordnungen, Integrationsgraden und Begriffen. Gruppenbericht der beteiligten Mitglieder; keine fertige 6G-Implementierung. Die konkreten Hallen- und Geometriebeispiele im Kapitel sind eigene Darstellungen.

[3] Texas Instruments - The fundamentals of millimeter wave radar sensors

SPYY005A, Juli 2020. Abschnitte Range Measurement und Range Resolution, insbesondere Gleichung 9 auf Seite 5. Hersteller-Lehrmaterial zu Radargrundlagen; die Bandbreitenrechnung im Kapitel ist keine Produktempfehlung und kein Nachweis einer 6G-Leistung.

[4] Braun, Schu, Sturm und Jondral - On the Single-Target Accuracy of OFDM Radar Algorithms

PIMRC 2011. Abschnitte II und IV zum Signalmodell, Zusammenhang zwischen Doppler und Geschwindigkeit sowie zu Genauigkeitsgrenzen. Originalforschung für ein vereinfachtes Einziel-Szenario; keine allgemeine Garantie für mehrere Objekte.

[5] Sandeep Rao - Introduction to mmWave Sensing FMCW Radars

Texas Instruments, Lehrfolien. Module 2 und 3 zur Phase und Bewegung sowie Modul 5 zur Winkelschätzung, insbesondere Folien 54–55 und 63. Grundlage der Erklärung, nicht die Festlegung eines 6G-Signalverfahrens.

[6] Alex Andrews - Radar Basics: How to Build a 24 GHz FMCW Radar System

Analog Devices, 24. Januar 2023. Abschnitt What Are You Trying to Detect und Radargleichung 1. Verwendet für Rückstreuwirkung und idealisierte Entfernungsabhängigkeit; keine Übernahme pauschaler Reichweiten oder Frequenznutzungsrechte.

[7] Texas Instruments - Understanding Range and Angular Resolution in mmWave Radar Devices

SWRA841A, Oktober 2025, überarbeitet Januar 2026. Abschnitt Range Resolution and Range Accuracy, Seiten 1–2. Begriffsgrundlage zur Trennung von Auflösung und Genauigkeit. Sämtliche Abstände in Abbildung 8.3 sind eigene Beispielwerte.

[8] Michael Davis - Radar Frequencies and Waveforms

Georgia Tech Research Institute; Vortrag beim 12. International Symposium on Advanced Radio Technologies. Bereitgestellt vom Institute for Telecommunication Sciences der US-Telekommunikationsbehörde National Telecommunications and Information Administration (NTIA). Folien 24–26 zu Bandbreite, Pulskompression und Entfernungsauflösung.

[9] 3GPP TS 38.305 - User Equipment positioning in NG-RAN

Version 16.1.0, Release 16, Juli 2020. Abschnitte 4.3.11–4.3.15 sowie 8.10–8.14 zu Rundlaufzeiten, Laufzeitdifferenzen und Winkeln. Historische normative 5G-Grundlage; keine Behauptung, dass jedes heutige Endgerät alle Verfahren unterstützt.

[10] Braun, Fuhr und Jondral - Spectral Estimation-based OFDM Radar Algorithms for IEEE 802.11a Signals

VTC 2012. Einleitung und Abschnitte II–III zu gemeinsamer Kommunikation und Radarauswertung, Signalmodell und Grenzen der Parametrisierung. Originalforschung; nicht als bereits verabschiedetes 6G-Verfahren eingeordnet.

[11] ETSI GR ISC 003 - System and RAN Architectures

Version 1.1.1, Februar 2026. Abschnitte 5 und 6, insbesondere 6.2.1.1–6.2.1.4 zu Interferenz, Signalen und Ressourcenverteilung. Bericht mit möglichen Architekturen und offenen technischen Fragen.

[12] 3GPP TS 22.137 - Integrated Sensing and Communication

Version 19.1.0, Release 19, ETSI-Ausgabe Januar 2026. Abschnitte 1 und 3.1 zu Geltungsbereich und Begriffen; Abschnitt 6 zu Leistungsanforderungen. Normative Anforderungen an einen 5G-Sensing-Dienst, keine fertige 6G-Funkschnittstelle.

[13] 3GPP TR 38.765 - Study on Integrated Sensing And Communication for NR

Offizieller Portaleintrag, abgerufen am 26. Oktober 2026. Typ Technical Report, Release 20; Version 20.0.0 mit Upload am 23. Juni 2026. Für Dokumentart und Versionsstand verwendet; der Portalstatus ist kein Feldnachweis.

[14] 3GPP - Release 20

Offizielle Release-Übersicht, Abruf und Einordnung am 26. Oktober 2026. Bereich Rel-20 early 6G Studies. Beleg für die Einordnung als frühe 6G-Studien.

[15] 3GPP - Release 21

Offizielle Release-Übersicht, Abruf und Einordnung am 26. Oktober 2026. Als erste normative 6G-Ausgabe vorgesehen; daraus werden hier keine garantierten ISAC-Funktionen abgeleitet.

[16] KIT IHE - SENSATION

Projektseite des beteiligten Forschungsinstituts, ausgewiesene Änderung 12. Februar 2026. Genannte Laufzeit Januar 2026 bis Dezember 2028. Belegt Projektziele und geplante Erprobung, keine bereits allgemein erreichte Sensorleistung.

[17] Gu und Mitautoren - Very High-Resolution Sensing and Communications Testbed with 5G mmWave Frontend

2025 IEEE Symposium on Joint Communications and Sensing, DOI 10.1109/JCS64661.2025.10880649. Autorenabstract im Forschungsportal der TUM. Belegt den Versuchsaufbau mit bis zu 4 Gigahertz momentaner Bandbreite; keine Übertragung auf Seriengeräte oder Flächennetze.

[18] ETSI GR ISC 004 - Security Privacy Trustworthiness and Sustainability

Version 1.1.1, Februar 2026. Abschnitte 5.7 und 5.8 zu Transparenz und zur Erfassung von Menschen ohne Netzverbindung. Technischer Gruppenbericht; keine eigene Rechtsgrundlage für eine konkrete Messung.

[19] Europäische Union - Datenschutz-Grundverordnung

Verordnung (EU) 2016/679, Artikel 4 Absatz 1 und Artikel 5 Absatz 1. Für Personenbezug, Zweckbindung, Datenminimierung und Speicherbegrenzung. Die allgemeine Einordnung ersetzt keine Prüfung eines konkreten Einsatzes.