

Herausforderung 6G

Was fehlt noch für die nächste Mobilfunk-Generation?

Welche Durchbrüche werden die technologische Innovation von 6G voraussichtlich beschleunigen und welche wenig beachteten Entwicklungen könnten die Branche überraschen?



Der Übergang von 5G zu 6G bedeutet weit mehr als nur eine Geschwindigkeitssteigerung. Er steht für einen grundlegenden Wandel in der Art und Weise, wie Netzwerke konzipiert, betrieben und monetarisiert werden. 6G soll Intelligenz und Sensorik in den Kern des Funksystems bringen, Frequenzstrategien neu definieren und Energie- und Kostenmodelle neugestalten.



Autorin:
Jessy Cavazos
6G Thought Leadership Director
Keysight Technologies
www.keysight.com

KI als Kernelement

In sämtlichen Fachdiskussionen wird ein Punkt deutlich: KI entwickelt sich von einer Zusatzfunktion zu einem grundlegenden Element des Netzwerkdesigns. In 5G wurde KI hauptsächlich auf Netzwerkebene und über RIC-Funktionen (RAN Intelligent Controller) eingesetzt; in 6G durchdringt sie das RAN und die Bitübertragungsschicht (PHY). Dieser Wandel erfordert standardisierte Workflows für Training, Modellaustausch und On-Device-Inferenz, die Definition von KPIs zur Messung von Genauigkeit, Latenz, Energie und Speicher sowie interoperable Schnittstellen, die den Betrieb von KI-Modellen in Umgebungen mit mehreren Anbietern ermöglichen.

Der unmittelbare Nutzen liegt in der zweiseitigen KI für PHY: Zusammenarbeit zwischen Basisstation und Anwendergerät (UE) zur Komprimierung und Ergänzung von Kanalzustandsinformationen (Channel State Information, CSI), schnellere Strahlsteuerung bei mobilen Anwendungen und KI für eine gemeinsame Quellen-Kanal-Codierung. Diese Funktionen sind keine wissenschaftlichen Projekte, sondern werden gerade deshalb geprüft, weil herkömmliche

Algorithmen im Frequenzbereich 3 (FR3) mit Tausenden Antennenelementen und Nahfeldeffekten an ihre Komplexitätsgrenzen stoßen. KI wird auch im RAN (Bild 1) eine wichtige Rolle spielen, indem sie die Spektrumsnutzung verbessert, Kosten senkt und die Energieeffizienz durch KI für RAN erhöht. Außerdem wird die Infrastrukturnutzung mit KI und RAN maximiert und neue Dienste und Anwendungen in Wireless-Netzwerken mit KI auf RAN ermöglicht. Agentenbasierte KI wird voraussichtlich auch eine wesentliche Rolle bei der Koordinierung von Optimierungsrichtlinien über alle Schichten hinweg spielen.

Der Paradigmenwechsel ist ebenso wichtig wie der technische Wandel: Statt feste Stacks zu optimieren, werden adaptive Stacks entwickelt, die lernfähig sind. „KI-nativ“ funktioniert jedoch nur, wenn alle eingesetzten Komponenten und Services getestet und gebenchmarket werden und verlässlich sind. Das Testen und Validieren von KI-nativen Designs unter realen Bedingungen erfordert fortschrittliche Messlösungen und das Fachwissen von Partnern, die sich sowohl im Bereich Wireless als auch im Bereich KI auskennen.

Neues Spektrum, neue Regeln: FR3 übernimmt die Führung

Die anfängliche Begeisterung für 6G konzentrierte sich auf Frequenzen im Sub-Terahertz-Bereich. Inzwischen hat sich der Fokus jedoch auf FR3 verlagert, den Zentimeterwellenbereich (cmWave) zwischen Frequenzbereich 1 (FR1) und Frequenzbereich 2 (FR2). Warum? Weil hier mehr Bandbreite mit einer praktikablen Abdeckung durch bestehende Makrostandorte verfügbar ist, wenn die Antennenelemente und das Beamforming skaliert werden und gleichzeitig die Energieeffizienz verbessert wird.

Die FR3-Agenda konzentriert sich auf drei Kernpunkte:

1. Abdeckungsparität durch bestehende Sendemasten

Die Größe der Antennenarrays wird auf hunderte oder tausende Elemente anwachsen, um die Verbindungsbudgets aufrechtzuerhalten. Das fördert Innovationen in den Bereichen Frontend-Effizienz, thermisches Design, Kalibrierung und Nahfeld-Beamforming.

2. Koexistenz und gemeinsame Nutzung

FR3 ist mit zahlreichen bestehenden Anwendungen überfüllt, darunter Satellitenkommunikation, Erderkundung und Verteidigungsradare. Es ist zu erwarten, dass schärfere Filter und Schutzbänder, Interferenzunterdrückung und dynamische Richtlinien für die gemeinsame Nutzung von terrestrischen und nicht-terrestrischen Netzwerken (TNs und NTNs) ebenso strategisch wichtig sein werden wie der reine Durchsatz.

3. Weltweite Harmonisierung

Fragmentierte Zuweisungen begrenzen die Geräteanzahl und verzögern die Abdeckung. Angesichts der bevorstehenden WRC-27 (World Radiocommunication Conference 2027) ist Harmonisierung kein Luxus, sondern eine Grundvoraussetzung für die Markteinführung von 6G.

Hardware, die alles verändert

Durchbrüche in der HF-Photonik und heterogenen Integration werden von der Theorie in die Praxis umgesetzt. Multifrequenz-Breitband-Photonik-Frontends versprechen verlustärmere, rekonfigurierbare Verbindungen von Mikrowellen bis zu Millimeterwellen (mmWave), während eine engere CMOS-Integration (Complementary Metal Oxide Semiconductor) von „HF + Mixed-Signal + Steuerung“ Größe, Gewicht, Leistung und Kosten am Funkmodul reduziert.

Gleichzeitig könnten RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces) und neue Materialien

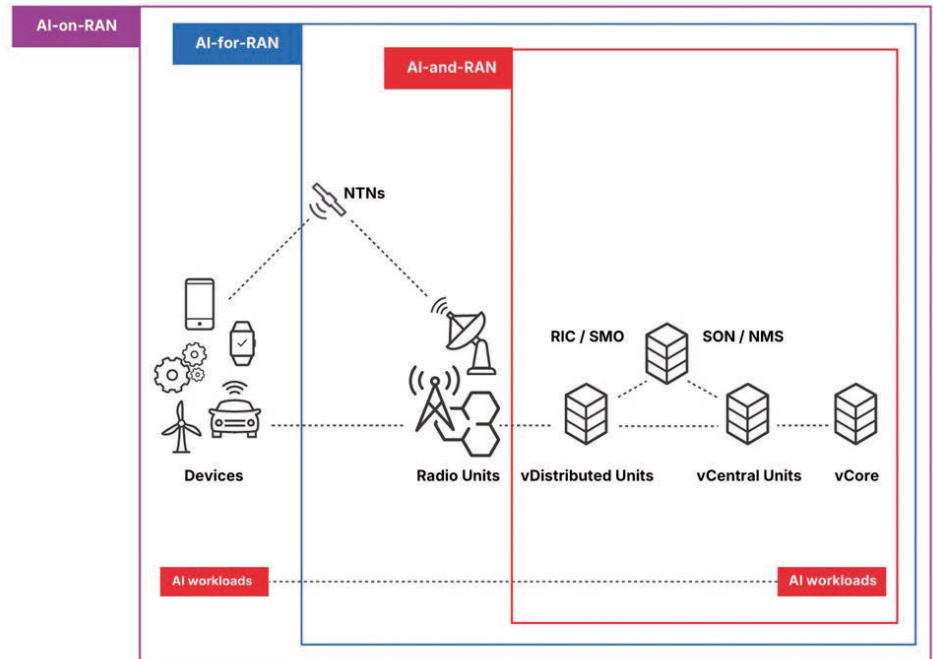


Bild 1: KI wird bei 6G im RAN eine wichtige Rolle spielen.

xMIMO (Extreme Multiple-Input Multiple-Output) praktikabel machen. Wenn RIS die Hürden in Bezug auf Kalibrierung, Steuerung, Zuverlässigkeit und Kosten nimmt, kann es den Kompromiss zwischen Abdeckung und Energieverbrauch neugestalten, insbesondere in FR3, indem es Felder steuert, anstatt nur die Leistung zu erhöhen.

Unauffällige Entwicklungen, die man im Auge behalten sollte

• Energie als vorrangige Design-Voraussetzung

Neben intelligenten Schemata sollten auch KI-gesteuerte Hardwareanpassungen im Auge behalten werden: Deep Sleep für gesamte HF-Ketten und Antennen-Subarrays, Envelope Tracking, fein abgestufte Spannungs-/Frequenzskalierung und verkehrsabhängige Wake/Sleep-Orchestrierung. Der Energieverbrauch ist der Faktor, der trotz steigender Antennenanzahl gesenkt werden muss.

• Digitale Zwillinge und hochpräzise Simulation

Da die Anzahl der Antennen, NTN-Verbindungen, RIS-Panels und Sensor-Overlays zunimmt, wird physisches Ausprobieren immer weniger praktikabel. Digitale Zwillinge, die auf Modellen basieren, in denen auch viele Störungen vorgesehen sind, werden immer wichtiger, um Risiken bei der Auswahl der Bitübertragungsschicht, der Koexistenzrichtlinien und der stadtweiten Bereitstellung vor Feldversuchen zu minimieren.

• Standardisierung der KI-Verfahren

Weniger glamourös als der Hype um KI, aber dennoch entscheidend: gemeinsam genutzte Datensätze mit realistischen Störungen, transparente Modelldokumentation, Anforderungen an die Reproduzierbarkeit und interoperable Modellaustauschformate, damit der Encoder einer Basisstation nahtlos mit dem Decoder eines UE interagieren kann.

Neudenken der Möglichkeiten von Wireless-Netzwerken

6G stellt neue Möglichkeiten für Wireless-Netzwerke dar. Bevor diese erkundet werden können, müssen zunächst zahlreiche Herausforderungen bewältigt werden, darunter die gemeinsame Nutzung von Frequenzen, KI und die zunehmende Komplexität der Tests.

Nachdem wir nun die technologischen Durchbrüche skizziert haben, die 6G vorantreiben, treten wir einen Schritt zurück und analysieren die technischen Herausforderungen, die zuerst bewältigt werden müssen, damit 6G sein Potenzial entfalten kann.

Frequenzspektrum: Koexistenz, gemeinsame Nutzung und Harmonisierung

Technischer Fortschritt und Politik sind untrennbar miteinander verwoben. Die Koexistenz mit bestehenden Satelliten- und Radarsystemen erfordert eine intelligentere gemeinsame Nutzung und strengere HF-Hygiene durch fortschrittliche Filter- und Schutzstrategien.

Um terrestrische und nicht-terrestrische Anforderungen über FR3 und darüber hinaus dynamisch auszugleichen, wird die gemeinsame Nutzung von Mehrfachfrequenzen (Multi-Radio Spectrum Sharing, MRSS) entscheidend sein.

Die Integration von NTN und TN bringt zusätzliche Herausforderungen hinsichtlich der schichtübergreifenden Interferenz mit sich und erfordert eine strenge Schutzbandplanung, Leistungskoordination und Interferenzunterdrückung.

Die globale Angleichung, die durch die Beschlüsse der WRC-27 und regionale politische Rahmenbedingungen vorangetrieben wird, wird letztlich die Verfügbarkeit von FR3 und das Tempo der Reifung des Ökosystems bestimmen. Während FR3 die pragmatische Kurve anführt, wird FR2 weiterhin das bevorzugte Band für Hotspots mit extrem hoher Kapazität und spezialisierte Anwendungen bleiben und damit die umfassenderen Abdeckungsziele von FR3 ergänzen.

KI in PHY und RAN: Von vielversprechend zu bewährt

KI wird sich nur dann bezahlt machen, wenn sie die strengen Auflagen des Funks übersteht:

• Datentreue

Training mit Datensätzen, die viele Störungen enthalten, darunter Phasenrauschen, Verzerrungen durch Leistungsverstärker, In-Phase- und Quadratur-Ungleichgewichte sowie realistische Interferenzen. Ein Training nur mit synthetischen Daten ist unzureichend; hybride Datensätze sind unverzichtbar.

• Erklärbarkeit und Reproduzierbarkeit

Entwickler müssen in der Lage sein, Entscheidungen nachzuvollziehen und unter identischen Bedingungen deterministisches Verhalten zu erwarten. Das bedeutet Modellintrospektion und robuste Bewertungsprotokolle.

• Latenz, Komplexität und Energie

Modelle müssen Fristen im Submillisekundenbereich und die Leistungsbudgetvorgaben für Mobilgeräte einhalten. Es ist mit aggressiver Komprimierung, Quantisierung, Pruning und Sparsity zu rechnen, die gemeinsam mit Hardware-Beschleunigern entwickelt wurden.

• Standardisierung und Interoperabilität

Ohne gemeinsame Modellschnittstellen und Metadaten kann zweiseitige KI nicht herstellerübergreifend skaliert werden. KPIs müssen nicht nur Link-Gewinne messen, sondern auch den Rechen-/Energieaufwand.

Tests von extrem großen Arrays

Bei Arrays mit 1000 bis 2000 Elementen wird das Testen zu einer Herausforderung erster Ordnung (Bild 2). OTA-Strategien müssen Nahfeldbedingungen, eine schnelle phasenkohärente Kalibrierung über Subarrays hinweg und Produktions-Testzyklen bewältigen, die die Wirtschaftlichkeit nicht beeinträchtigen. Zu erwarten sind Mehrfach-Tastkopf-Kammern, Nahfeld-zu-Fernfeld-Transformationen und neue Systemkonfigurationen für die Überwachung des Array-Zustands im Feld.

Integrierte Sicherheit

Sicherheit muss in 6G verankert sein:

- Zero-Trust-Architekturen mit Hardware-„Roots of Trust“, sicherem Bootvorgang und kontinuierlicher Authentifizierung vom Chip bis zur Cloud
- Quantensichere Kryptografie und Kryptoagilität, da die Lebenszyklushorizonte die Zeit bis zur praktischen Quantenbedrohung überschreiten
- Bedrohungen im Zeitalter der KI, wie Datenverfälschung, Modelldiebstahl, feindliche Störungen und domänenübergreifende Angriffe, erfordern eine KI sowohl zur Verteidigung als auch zur Leistungssteigerung.
- Resilienz der Bitübertragungsschicht: Störungsresistenz, Spoofing-Resistenz, kanalbasierte Verschlüsselung und Privatsphäre auf Strahlebene, insbesondere da FR3 und FR2 stark gerichtete Verbindungen ermöglichen, die sowohl als Schutzschild als auch als Angriffsvektor dienen können

Auswahl und Überprüfung der ersten Welle von ISAC

Die überzeugendsten ersten Erfolge von ISAC (Integrated Sensing and Communications, Bild 3), bei denen Makro-Footprints zu Makro-Sensoren werden, sind:

- **kritische Infrastruktur und Smart Cities**
Kontinuierliche Überwachung des baulichen Zustands von Brücken und Tunneln, Erkennung von Veränderungen der Straßenoberfläche, Erfassung der Personendichte und Einhaltung von Verkehrsregeln. Die zentimetergenaue Positionsbestimmung revolutioniert kommunale Abläufe und Notfallmaßnahmen.

• Autonomie und fortschrittliche Mobilität

kooperative Wahrnehmung zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, netzwerkgestützte Erkennung für Drohnen und Mikromobilität sowie höhere Sicherheit für Fußgänger und Radfahrer durch fusionierte Sensorik

• industrielle Automatisierung und Gesundheitswesen

millimetergenaue Ortung für kollaborative Roboter und Logistik, berührungslose Sturzerkennung und Vitalparameter-Proxys für die Altenpflege

• Luftfahrt- und NTN-Szenarien

Verkehrs-Management für unbemannte Luftfahrzeuge (UAV) und NTN-TN-Handover-Sensorik, wobei die ständige Überwachung des Luftraums eine Voraussetzung für Sicherheit und Spektralhygiene ist.

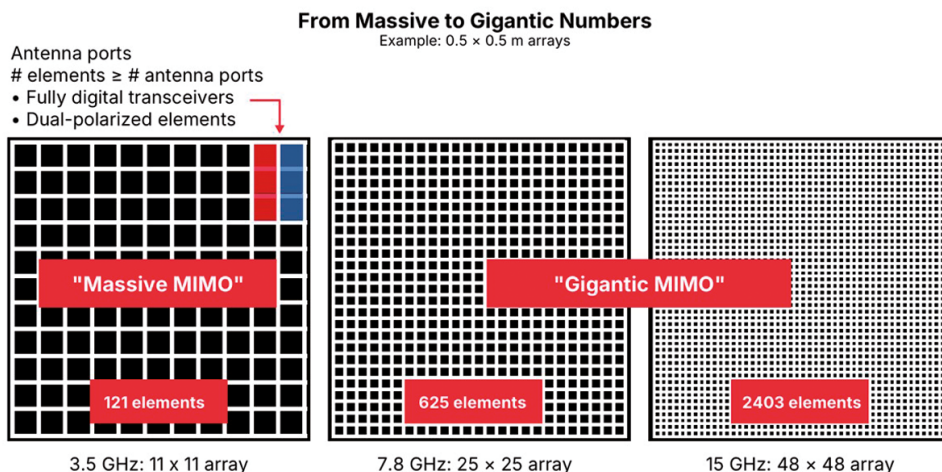


Bild 2: Der Test der extrem großen Antennenarrays wird bei 6G zu einer Herausforderung.

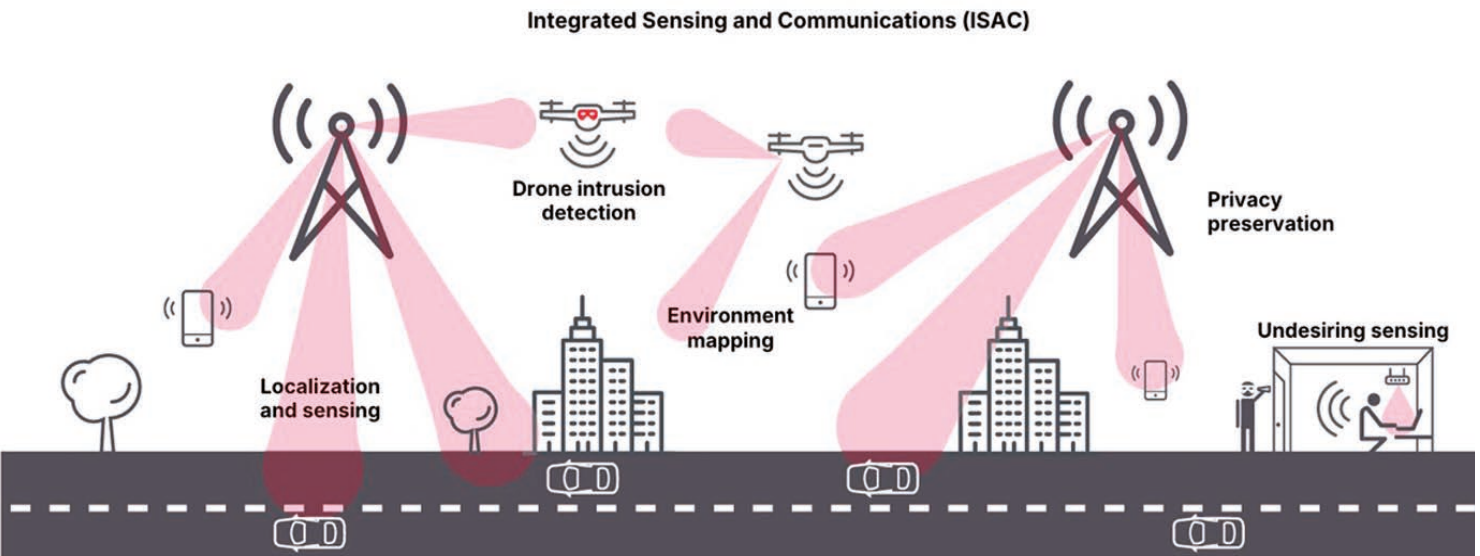


Bild 3: Für ISAC wird 6G deutliche Fortschritte ermöglichen.

Es handelt sich hierbei zweifellos um erhebliche Hürden, die nicht von heute auf morgen überwunden werden können. Es gibt jedoch einige pragmatische Überlegungen für die nächsten zwölf Monate, um die nächste Phase der industriellen Reife voranzutreiben, darunter:

- **Frühzeitige Ausrichtung auf KI-Schnittstellen und KPIs**

Wenn zweiseitige KI skaliert werden soll, muss sich die Branche auf Modellaustauschformate, Metadatenschemata und Bewertungskennzahlen einigen, die neben den Vorteilen auf Verbindungsebene auch Latenz, Energieverbrauch und Rechenaufwand berücksichtigen.

- **Investitionen in FR3-Felddaten**

Datensätze zur Ausbreitung und Interferenz auf Stadtebene für FR3, die verschiedene Klimazonen, Morphologien und etablierte Betreiber abdecken, sind unerlässlich. Reale Daten sind weitaus besser geeignet als Simulationen allein, um Schutzbänder, Filterspezifikationen und Strategien zur Interferenzunterdrückung zu gestalten.

- **Energie als Eingangsgröße für das Design statt als Ergebnis**

Vom Basisband über HF bis hin zur Antennensteuerung sollten KI-gesteuerte Sleep-Orchestrierung und adaptive Duty-Cycling-Funktionen eingeplant werden. Energie-KPIs sollten mit derselben Strenge wie Durchsatz und Latenz veröffentlicht und als Pass/Fail-Kriterien für Funktionen herangezogen werden

- **Einsatzbereitschaft Digitaler Zwillinge**

Die Modelle dienen dazu, vor Feldversuchen verschiedene PHY-Optionen, ISAC-Kompromisse, RIS-Platzierungen, NTN/TN-Handover und stadtweite Bereit-

stellungen zu analysieren. Der Kreislauf wird geschlossen, indem die Modelle mit realen Störungsdaten aus Live-Bereitstellungen gespeist werden.

- **Sicherheit grundlegend und offensiv gestalten**

Zero Trust sollte Standard sein. Red-Team-Übungen, die KI-Gegner und NTN-Vektoren beinhalten, helfen dabei, die Sicherheit aufrechtzuerhalten. Kryptoagilität erlaubt es, Algorithmen zu rotieren, ohne die Infrastruktur zu gefährden. Sind Herkunft und Beglaubigung der Modelle in KI-Pipelines integriert, geben sie Auskunft darüber, was eingesetzt wurde und ob es intakt ist.

- **Demonstrationen mit mehreren Beteiligten**

Zu den wichtigsten Meilensteinen für 2026 zählen interoperable Demonstrationen. Betreiber, Infrastrukturanbieter, Chiphersteller und Partner aus dem Bereich Messtechnik müssen zusammenarbeiten und gemeinsame Validierungsrahmen nutzen, um die Überprüfung durch mehrere Parteien zu beschleunigen.

Jenseits von Geschwindigkeit

Bei 6G geht es nicht um einen Wettlauf um die höchste Datenrate, sondern um einen architektonischen Wandel, der neue Möglichkeiten für die kabellose Kommunikation eröffnet. Die kurzfristige Realität besteht aus FR3-Pragmatismus, KI-nativen Arbeitsabläufen und Sensoren, die eine universelle Abdeckung in universelle Wahrnehmung verwandeln.

Wenn es gelingt, Frequenzen zu harmonisieren, die Energiekurve zu zähmen, KI-Praktiken zu standardisieren, Tests für sehr

große Arrays zu skalieren und von Anfang an Sicherheit zu integrieren, wird 6G seinen Status als nächste Generation nicht durch Schlagzeilen-Geschwindigkeiten, sondern durch Intelligenz und Zuverlässigkeit auf Systemebene verdienen.

Keysight beschleunigt die 6G-Forschung mit leistungsstarken Messlösungen, die 6G-Signale über das gesamte Spektrum hinweg erzeugen und analysieren, komplexe und dynamische Umgebungen nachbilden sowie KI/ML-Modelle trainieren, verifizieren und optimieren, um die PHY- und RAN-Leistung zu verbessern. 6G-Forscher können selbst die anspruchsvollsten Messungen reproduzierbar durchführen und exklusive Erkenntnisse gewinnen, die ihren Weg vom Konzept zur Realität beschleunigen.

Wer schreibt:

Jessy Cavazos ist seit Januar 2019 im Marketingteam für Branchenlösungen von Keysight tätig und konzentriert sich auf 5G/6G. Davor war Jessy Cavazos als Industry Director für den Bereich Test & Measurement bei Frost & Sullivan tätig. Sie kam 2002 zu dem globalen Beratungs- und Marktforschungsunternehmen und verfolgte die Test- und Messtechnikbranche mehr als 15 Jahre lang.

Jessy hat zahlreiche Marktstudien verfasst, die wichtige Chancen und disruptive Trends aufzeigen, und wurde in branchenführenden Publikationen veröffentlicht.

Jessy hat einen Bachelor-Abschluss in International Business vom Institut de Formation Internationale in Rouen, Frankreich, das jetzt Teil der NEOMA Business Schools ist. ◀