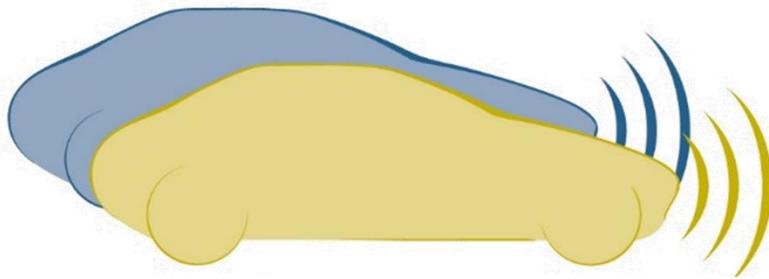


IMIKO-Radar – Interferenzminimierung durch Kooperation bei
Radarsensoren für autonome Elektrofahrzeuge

AP09 Gesamtbewertung

Gesamtbewertung und Empfehlung
für Standardisierung



IMIKO - Radar

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Impressum

Herausgeber:

Konsortium des öffentlich geförderten Projektes IMIKO-Radar – Interferenzminimierung durch Kooperation bei Radarsensoren für autonome Elektrofahrzeuge

<https://www.elektronikforschung.de/projekte/imiko-radar>

Koordinator / Ansprechpartner:

Robert Bosch GmbH
Dr.-Ing. Werner Sörgel
Robert-Bosch-Campus 1
71272 Renningen
werner.soergel@de.bosch.com

Autoren:

F. Borngräber (Continental), A. John (HELLA), W. Sörgel (Bosch), R. Körber (cruise munich), T. Vogler (CTC advanced) E. Miel (Continental), F. Torres (APTIV), M. Kritzner (veoneer), H. Gölz (veoneer), J. Moss (veoneer), M. Behrens (smartmicro), A. Ossowska (Valeo), L. Tovar-Torres (Uni Ulm), A. Giere (cruise munich), C. Waldschmidt (Uni Ulm), T. Zwick (KIT)

Stand: Mai 2022

Bildnachweis:

Alle Abbildungen wurden im Rahmen des öffentlich geförderten Projektes IMIKO-Radar durch die Projektpartner selbst erstellt.

Inhalt

Impressum	1
Inhalt	2
Akronyme.....	4
Begriffsbestimmungen.....	4
1 Einleitung in die Gesamtbewertung	5
1.1 Beteiligte Partner und Projektstruktur	6
2 Notwendige Freiheitsgrade für leistungsfähige Radarsensoren.....	8
2.1 Wellenform	8
2.2 Bandbreite.....	10
2.3 Ausgangsleistung	10
2.4 Mehrere Sensoren im gleichen Fahrzeug	11
2.5 Polarisation	11
2.6 Übertragung von Verfahren aus dem Mobilfunk.....	11
3 Erklärung und Zusammenfassung der kooperativen Interferenzminderung	12
3.1 Ansatz für kooperative Interferenzminderung	12
3.2 Anforderungen bzgl. Wirksamkeit und Nutzen der Methoden	13
3.3 Anforderungen bzgl. Aufwand für die Methoden	13
4 Diskussion und Bewertung der Schwachen Kooperation	14
4.1 Zufälliger Frequenzwechsel	14
4.1.1 Erkenntnisse zur Wirksamkeit.....	15
4.1.2 Einschätzung Aufwand.....	15
4.2 Fahrtrichtungsabhängiger Frequenzwechsel (Kompassmethode)	15
4.2.1 Erkenntnisse zu Wirksamkeit bzw. Nutzen	16
4.2.2 Einschätzung Aufwand.....	16
4.3 Zufälliger Timingwechsel.....	17
4.3.1 Erkenntnisse zu Wirksamkeit bzw. Nutzen	17
4.3.2 Einschätzung Aufwand.....	17
4.4 Analyze before Measure	18
4.4.1 Erkenntnisse zu Wirksamkeit bzw. Nutzen	18
4.4.2 Einschätzung Aufwand.....	18
4.5 Sofortige Chirp Unterbrechung bei Interferenz.....	18
4.5.1 Erkenntnisse zu Wirksamkeit bzw. Nutzen	18

4.5.2	Einschätzung Aufwand	19
5	Diskussion und Bewertung Methoden „Starke Kooperation“	19
5.1	Gegenüberstellung zentraler und dezentraler Ansatz	19
5.2	Mittelstarke versus starke Kooperation	20
5.3	Allgemeine Einschätzung Aufwand	20
5.4	Modified Radar Mac	21
5.4.1	Einschätzung Aufwand	21
5.5	Radar Netzwerk mit zentralem Server	21
5.5.1	Einschätzung Aufwand	22
5.6	Kognitives Radar mit Kommunikationsfähigkeit	22
5.6.1	Einschätzung Aufwand	22
5.7	Heuristisches Ausweichverfahren basierend auf CPM	22
5.7.1	Einschätzung Aufwand / besondere Anforderungen	23
5.8	Anforderungen an die Kommunikation	23
6	Übersichtstabelle zur Bewertung der kooperativen Minderungsmaßnahmen	24
7	Bewertung der Interferenzmesstechnik	25
7.1	Lessons learned Verifikation / Ringversuch (AP7)	25
7.2	Bewertung Mess-Methoden aus AP4	26
7.2.1	Verwendbarkeit für ein standardisiertes Messverfahren	26
7.2.2	Eignung für standardisierte Tests	27
7.3	Bewertung aus Sicht der Sensorhersteller	27
8	Aktivitäten von internationalen Standard- Organisationen	28
9	Empfehlung aus Sicht von IMIKO-Radar	29
10	Referenzen	31
11	Anhang Simulationsergebnisse	33
11.1	Ergebnisse Simulationen Universität Ulm	33
11.2	Simulations-Ergebnisse Vereinfachte Simulation	42
12	Anhang Messergebnisse aus AP4	44
12.1	Ergebnisse der Messungen zur schwachen Kooperation aus AP4	45
12.1.1	Ergebnisse für schmalbandige Störer	46
12.1.2	Ergebnisse für breitbandige Störer	49
12.2	Zusatzergebnisse der Messungen zur schwachen Kooperation aus AP4	53
12.3	Messungen zur starken Kooperation	53

Akronyme

CAM	Cooperative Awareness Message
CPM	Collective Perception Message
DSRC	Dedicated Short Range Communications
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FoV	Field of View, Sichtfeld des Sensors
IMM	Interferenz Minderungs Maßnahme
INR	Interference to Noise Ratio
IP	Intellectual Property
kIMM	kooperative Interferenz Minderungsmaßnahme
MAC	Medium Access Control
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
PMCW	Phase Modulated Continuous Wave
SNIR	Signal to Noise and Interference Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
V2X	Vehicle Car to Everything

Begriffsbestimmungen

SNR: Das Rauschen (Noise) im Signal to Noise Ratio schließt im folgenden Dokument die Interferenz mit ein, soweit diese aus Sicht der Detektion des Sensors nicht vom Rauschen zu unterscheiden ist. D.h. SNR und SNIR werden synonym verwendet.

1 Einleitung in die Gesamtbewertung

Anfang der 1970er Jahre wurden die ersten Radar-Sensoren in Fahrzeugen installiert [Meinel] und seitdem ist auch das Thema der Interferenz zwischen Fahrzeug-Radaren betrachtet worden:

- Die erste Untersuchung zu Interferenz zwischen zwei Automobil-Radar Sensoren wurde im Jahr 1975 berichtet [Chandler75]. Damals schon wurde ein Ausweichen in Frequenzrichtung z.B. mit Hilfe von Frequency Hopping vorgeschlagen.
- Im Jahr 1995 wurde in [Hischke95] auf die Möglichkeit von wechselseitiger Interferenz bei Szenen mit mehr als zwei Sensoren aufmerksam gemacht.
- Anfangs gab es wenig Radare und deshalb auch wenig Interferenz. Die Hardware war zu diesem Zeitpunkt noch weniger flexibel als heute. Außer 45°-Polarisation gab es keine Minderungsmaßnahmen. Die 45° Polarisation zur Entkopplung von entgegenkommenden Sensoren konnte sich allerdings unter anderem wegen der Anforderungen eines verdeckten Einbaus nicht durchsetzen.
- Im EU-Projekt More Safety for All by Radar Interference Mitigation, MOSARIM (2010 – 2012), wurde das Interferenzverhalten von Automobil-Radaren systematisch untersucht und verschiedene Abhilfemaßnahmen aufgezeigt [MOSARIM].
- Mit wachsender Radar-Stückzahl und Modell-Vielfalt gab es dann Hersteller-spezifische Abhilfemaßnahmen, wie z.B. zufälliger Wechsel von Frequenz und Timing.
- Mit wachsender Rechenleistung wurden Hersteller-spezifische Reparatur-Verfahren implementiert.

Heutiger Stand der Technik sind also verschiedene, Hersteller-spezifische, unkooperative Verfahren, siehe z. B. [Engels21], [MOSARIM].

In diesem Projekt sind nun neue Verfahren untersucht worden, die drei verschiedene Kooperationstiefen anwenden, siehe Bild 1.

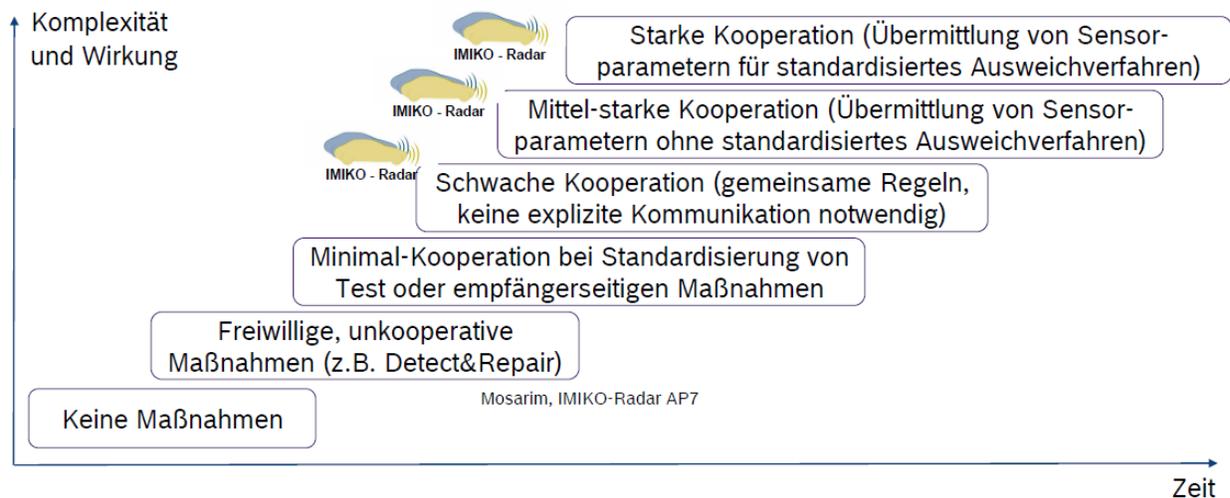


Bild 1 Entwicklung von Interferenz-Gegenmaßnahmen über der Zeit.

Im Folgenden sind verschiedene Themenfelder der kooperativen Interferenzminderung aufgelistet, die z.T. unterschiedliche Betrachtungsweisen erfordern. Dies begründete die Komplexität dieser Aufgabe.

- **Regulierungsaspekte**
 - Technologieneutralität
 - Länder- oder Kontinent spezifische Vorschriften
 - z.B. Bandbreitenbeschränkungen
- **Standardisierungsgremien**
 - national und international
 - Schnittstellendefinition
- **Systemaspekte**
 - Welche Möglichkeiten gibt es aus Systemsicht, um Interferenz zu minimieren?
 - Funktionsein- oder -beschränkung durch Interferenz.
 - z.B. Frequenzhopping, Modulationsart, Timing, Kompassmethode
- **Notwendigkeiten für Ressourcen**
 - z.B. Bandbreite um bestimmte Sensor-Funktionen zu gewährleisten
 - z.B. Infrastruktur für Kommunikation
- **Sensor zu Sensor Interferenz-Analyse**
 - Mehrere Sensoren im Einzelfahrzeug
 - Mehrere Sensoren in mehreren Fahrzeugen
- **Bewertungsmethoden für Interferenz**
 - Messverfahren und deren Standardisierung
 - Einzelsensor- und System(Fahrzeug)-ebene
- **Klassifizierung („Rating“) von Sensoren**
 - Entscheidungsgrundlagen
 - Testverfahren

Um die Komplexität der Untersuchungen in Grenzen zu halten, wurden folgende Aspekte im Projekt nicht berücksichtigt:

- Interferenz-Szenarien mit nicht-Automotive-Funkanwendungen im gleichen Frequenzband
- Interferenz-Szenarien für Radar-Sensoren im Fahrzeug-Innenraum
- Interferenz-Szenarien, die nur für Nutzfahrzeuge relevant sind
- Interferenz-Szenarien in umschlossenen Räumen wie Tunneln oder Parkhäusern
- Radar-Messung als Nebenfunktion einer drahtlosen Kommunikationseinrichtung

1.1 Beteiligte Partner und Projektstruktur

Die Projektlaufzeit begann am 01. November 2018 und endete am 31. Januar 2022.

Projektpartner sind

- APTIV Services GmbH, Wuppertal
- Continental AG, Lindau

- Cruise Munich GmbH, Ottobrunn
- CTC advanced GmbH, Saarbrücken
- HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe
- Robert Bosch GmbH, Renningen
- smart microwave sensors GmbH, Braunschweig
- Universität Ulm
- Valeo Schalter GmbH, Bietigheim-Bissingen
- Veoneer Germany GmbH, Schweinfurt

Assoziierte Projektpartner sind

- Mercedes-Benz AG, Sindelfingen
- Rohde&Schwarz GmbH & Co. KG, München
- Volkswagen AG, Wolfsburg

Das Vorhaben wird von der Robert Bosch GmbH koordiniert. Ansprechpartner ist Dr. Werner Sörgel, werner.soergel@de.bosch.com

Das Konsortium erfüllt alle legalen Anforderungen insbesondere auch die des Kartellrechts. Im Konsortialvertrag sind hierzu insbesondere die klare Eingrenzung der behandelten, vorwettbewerblichen Themen, der Form des Austauschs im Projekt und die Anonymisierung von Messergebnissen einzelner Projektpartner geregelt.

In Bild 2 ist die Projektstruktur mit den verschiedenen Arbeitspaketen dargestellt. Der vorliegende Text dokumentiert das Ergebnis aus AP9 Bewertung und Empfehlung. In AP9 sind insbesondere die Partner APTIV, Bosch, Continental, cruise munich, CTC advanced, Hella, smartmicro, Valeo, Veoneer und VW beteiligt.

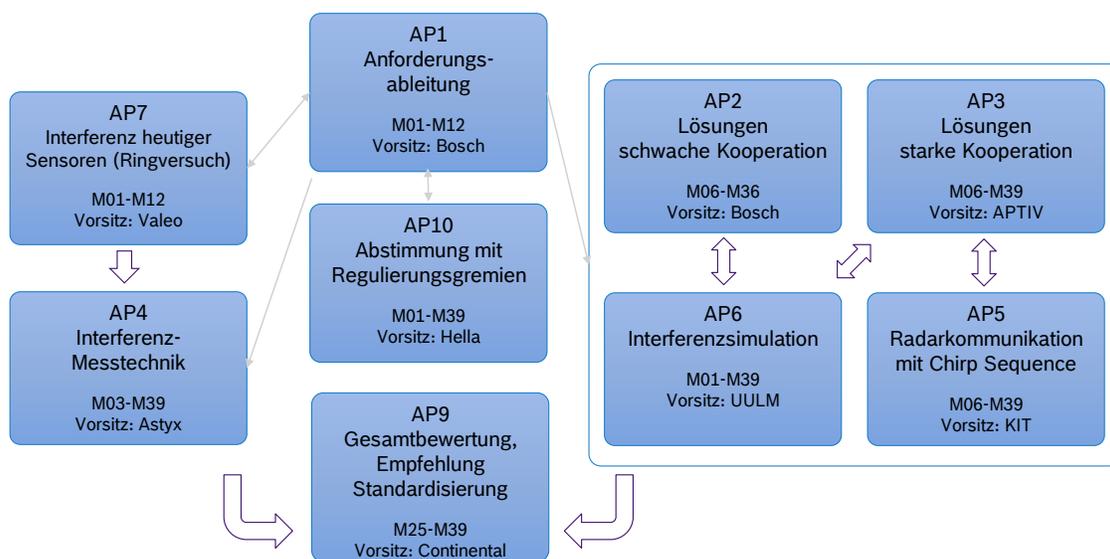


Bild 2 Projektstruktur des ögP IMIKO-Radar

2 Notwendige Freiheitsgrade für leistungsfähige Radarsensoren

Im Folgenden werden wesentliche Randbedingungen für die Interferenzminderung betrachtet, die nicht direkt einzelnen kooperativen Interferenz-Minderungsmethoden zuzuordnen sind, sondern für die verschiedenen Methoden gleichermaßen gelten, und die gewährleisten sollen, dass eine ausreichende Leistungsfähigkeit von Radarsensoren möglich bleibt.

2.1 Wellenform

Die für automobil Radar verwendeten Wellenformen lassen sich nach ihrer instantanen (augenblicklichen) Bandbreite unterscheiden:

- Instantan schmalbandige Signale wie z.B. lineare Frequenzmodulation, FMCW oder chirp sequence überstreichen mit einem schmalbandigen Träger-Signal im zeitlichen Verlauf die gesamte Nutzbandbreite.
- Instantan breitbandige Signale wie z.B. PMCW oder OFDM überdecken zu jedem Moment ihrer Aussendung die gesamte Nutzbandbreite. Radare mit diesen Modulationsarten werden auch als digitale Radare bezeichnet.

Die lineare Frequenzmodulation in Form von FMCW oder chirp sequence ist die am weitesten verbreitete Modulationsart im Feld. Das vorliegende Forschungsvorhaben konzentriert sich auf die gegenseitige Störung zwischen FMCW oder chirp sequence Radaren und ist auch begründet durch die Verfügbarkeit entsprechender Hardware der teilnehmenden Industrie-Projektpartner. Seit einigen Jahren versuchen nun die ersten kommerziellen Automobil-Radare mit instantan breitbandigen, digitalen Modulationsarten wie z.B. PMCW am Markt Fuß zu fassen. OFDM-Radare sind noch Gegenstand aktueller Forschung. Neben den in diesem Projekt zusammengefassten Ergebnissen zur gegenseitigen Interferenz von FMCW und chirp sequence Radaren stellen aus Sicht der Bestandsradare instantan breitbandige, digitale Modulationen ein kritisches Interferenz-Signal dar, da die instantan breitbandige Aussendung, je nach Pulslänge/Symbollänge, Symbolabstand und duty cycle sowie Opfer-Wellenform, im schlimmsten Fall eine durch die Signalverarbeitung des Opfers nicht mehr korrigierbare Störung erzeugt. In diesem Fall stört die instantan breitbandige Aussendung das Opfer-Basis-Bandsignal, bei gleicher oder größerer Bandbreite, rausch-ähnlich über die komplette Dauer der zeitlichen Überlagerung von Puls/Symbol und Opfer-Wellenform. Es besteht Grund zu der Annahme, dass es in diesem Fall keine ungestörten Abtastwerte mehr gibt, aus denen das Originalsignal rekonstruiert werden könnte. Diese Rekonstruktion funktioniert bei der Störung durch ein instantan schmalbandiges Signal in den meisten Fällen gut, da typischerweise nur wenige Abtastwerte gestört werden. Daher stören in diesem Fall die instantan breitbandigen Radare das instantan schmalbandige chirp-sequence Opfer stärker als instantan schmalbandige Störer. Für FMCW Radare sind für Interferenzen untereinander schon zahlreiche Erfahrungen und Verfahren verfügbar.

Verschiedene Lösungs-Vorschläge wurden kontrovers diskutiert, wobei im Rahmen von IMIKO-Radar keine technische Option gefunden werden konnte, die als ausreichend brauchbar erachtet wird. Es besteht weiter ein dringender Forschungsbedarf hinsichtlich Lösungen für die Koexistenz von Radaren mit instantan breitbandigen und instantan schmalbandigen Signalen, da instantan breitbandige Radare Innovationspotenzial beim Thema Sendekanal-Multiplexing und Flexibilität der Modulation, auch bzgl. der Behandlung von Interferenz haben.

Folgende technische Optionen sind in der Diskussion beigetragen worden:

- 1.) Während des aktiven Sendens ist nur eine lineare Frequenzmodulation erlaubt.
Beispiel: Der Start von zwei Chirps muss eine gewisse Zeit auseinanderliegen.
Während des Frequenzrücksprungs muss der TX deaktiviert sein, darf aber vor dem eigentlichen Chirp schon eingeschaltet werden, wenn die Frequenz in dieser Zeit um weniger als 5MHz (bei <1GHz Bandbreite) bzw. 20MHz (bei <4GHz Bandbreite) auf konstanten Wert einschwingt. Schmalbandig codierter CW-Betrieb ist erlaubt (= Chirp mit Steigung 0).
Damit wären digitale Radare ausgeschlossen. Darüber hinaus würden die Wahlmöglichkeiten der Modulationsparameter der Chirp-Sequence bzw. LFM CW-Radare reduziert.
- 2.) Instantan breitbandige Radare sollen auf einen Teilfrequenzbereich innerhalb der 77-81 GHz beschränkt werden, wobei auch FMCW / chirp sequence Radare in diesem Teilfrequenzbereich arbeiten dürfen. Dieses Teil-Frequenzband für digitale Radare müsste mindestens 1 GHz breit sein. Der Frequenzbereich zwischen 76-77GHz sollte hier besonders geschützt werden, da sich hier die Bestandsradare aktuell konzentrieren.
Dieser Vorschlag erfordert weitere Forschung und Entwicklung, wie ein solcher Test sinnvoll definiert werden könnte.
Als Folge dieser Option können die digitalen Radare nur den Teilfrequenzbereich nutzen. Im Teilfrequenzbereich können die chirp sequence Radare durch instantan breitbandige Radare gestört werden.
- 3.) Ein Kompromiss könnte sein, von-zukünftigen Radaren geeignete Maßnahmen ggf. auch mit Nachweis in einem Test zur Koexistenz mit den bestehenden Radaren im Feld zu fordern. Hierbei könnten die digitalen Radare auch Verfahren aus AP2 (schwache Kooperation, siehe Kapitel 4) und AP3 (Starke Kooperation siehe Kapitel 5) nutzen, die unabhängig von der gewählten Wellenform sind (z.B. Kompassmethode oder Random Hopping, etc.) sinnvoll eingesetzt werden. Dies wäre ggf. Thema für einen entsprechenden Funkstandard (d.h. die Standardisierung).
Die Folge dieser Option wäre ein erhöhter Testaufwand für neue Radare. Es bleibt das Spannungsfeld zwischen Zusatzaufwänden für zukünftigen Radare und dem Bestandsschutz der bereits im Feld befindlichen Radare.
- 4.) Alternativ könnte von instantan breitbandigen Radaren gefordert werden, lineare Radarmodulationen zu erkennen, zu präzisieren und entsprechende Unterträger / Frequenzbereiche in den folgenden Symbolen nicht zu verwenden. Die betroffenen Unterträger könnten vom digitalen Radar, bei entsprechender Überlagerung mit linear modulierten Signalen, aufgrund der komprimierten Störenergie, ohnehin nicht gewinnbringend verwendet werden. Eine Auswertung hinsichtlich Störer Charakteristik und Position auf der Empfangsseite ist unabhängig vom gesendeten Symbol möglich.
In Folge ergäbe sich eine zusätzliche Anforderung an die instantan breitbandigen Radare, die je nach Typ und Auslegung zu entsprechenden Mehraufwänden führen würde.

- 5.) Keine weitere Regulierung/Standardisierung der Koexistenz zwischen instantan breitbandigen und instantan schmalbandigen Radare hätte zur Folge, dass die Wahrscheinlichkeit von kritischen Störungen bzw. Blindheit der instantan-schmalbandigen Sensoren mit der weiteren Verbreitung von instantan breitbandigen Sensoren überproportional zunimmt.

2.2 Bandbreite

Das Ausschöpfen der vollen Bandbreite des Frequenzbandes von 76-77 GHz für Fahrfunktionen, die dieses erfordern, muss erlaubt sein. Eine starre Unterteilung in Unterkanäle wird wegen der für verschiedene Funktionen (z.B. automatisiertes Parken) notwendigen Entfernungstrennfähigkeiten für nicht sinnvoll erachtet.

Das Ausschöpfen der vollen Bandbreite des Frequenzbandes von 77-81 GHz für Fahrfunktionen, die dieses erfordern, muss erlaubt sein. Eine starre Unterteilung in Unterkanäle wird wegen der für verschiedene Funktionen notwendigen Entfernungstrennfähigkeiten z.B. für das automatisierte Einparken für nicht sinnvoll erachtet.

Eine einheitliche Regulierung der Frequenzbänder 76-77GHz und 77-81GHz, wie sie z.B. in USA, Kanada und Brasilien heute schon gegeben ist, wird für die Ermöglichung des Ausweichens in Frequenz auch für den Rest der Welt als sehr wünschenswert erachtet. Entsprechende Wünsche sind seitens der Industrie für Europa bei CEPT [CEPT_79GHz] und in ETSI SR DOC TR 103 593 [ETSI_79GHz] adressiert.

Idealerweise entsteht aus den IMIKO-Radar Ergebnissen ein Standard, der dann für neue Radare eine kooperative Interferenzminderung in diesem durchgängigen Frequenzband festschreibt.

Wie wichtig die zukünftige Verfügbarkeit eines durchgängig verwendbaren Frequenzbandes von 76 - 81 GHz ist erschließt sich, wenn man Bild 16 und Bild 15 in Anhang-Kapitel 11.1 betrachtet: Für eine Autobahnszene mit dichtem Verkehr und 5 Sensoren pro Auto ergibt sich im Mittel die Notwendigkeit von 20 unabhängigen Ressourcen (sog. Farben, siehe Bild 16), um bei optimaler Ressourcenverteilung zu einem nominell interferenzfreien Betrieb gelangen zu können. Nimmt man an, dass ca. 3/5 der Radare in der Ausweichrichtung Frequenz getrennt werden müssen, da die Richtungen Zeit und Polarisation weniger Platz und Möglichkeiten bieten [IMIKO-AP2.2, Abschnitt 4], so würden bei einem mittleren Bandbreitebedarf von z.B. 1 GHz pro Radar für diese Szene im Mittel 12 GHz Spektrum für den vollständig interferenzfreien Betrieb benötigt. Entsprechend wichtig ist die zukünftige durchgängige Verwendbarkeit der 5 GHz im Frequenz-Bereich 76-81 GHz, welche bei gleichen Annahmen für das Kreuzungsszenario in Bild 16 knapp ausreichend wären.

2.3 Ausgangsleistung

Für eine Verbesserung des Signal-zu-Rausch-und-Interferenzleistungs-Verhältnisses SNIR ist nur eine unsymmetrische Verringerung der Leistung wirksam, bei der ein Sensor Ressourcen zu Gunsten eines anderen aufgibt, siehe auch [IMIKO-AP2.2, Abschnitt 4.4.5]. Solch ein Vorgehen ist jedoch bzgl. Sicherheitsaspekten schwierig abzusichern. Die Gleichberechtigung der Sensoren bzgl. ihres Zugriffs auf die Ressourcen ist schwierig sicherzustellen.

Aus diesen Gründen wird auch eine Reduktion der Sendeleistungen bei kleinen Geschwindigkeiten nicht empfohlen, da z.B. das automatisierte Anfahren im Stau die volle Sensor-Leistungsfähigkeit benötigt.

Verschiedene Vorschläge zu einer Gestaltung von Regeln zur Sendeleistung wurden kontrovers diskutiert. Aus der Sicht eines Teils der Projektpartner sollte dies besser direkt bei CEPT und ETSI diskutiert werden, da es kein IMIKO-Radar Kernthema betrifft.

2.4 Mehrere Sensoren im gleichen Fahrzeug

Bei der interferenzarmen Auslegung des Sensorsystems spielt das Systemkonzept des jeweiligen Fahrzeughersteller eine tragende Rolle. Für Ausweichverfahren bedeutet dies auch, dass ein fahrzeuginternes Mitigierungsschema (z.B. Zeit-Multiplex wie in [IMIKO-AP2.3, Abschnitt 3]) abgestimmt ist mit den kooperativen Interferenzminderungsmaßnahmen über mehrere Fahrzeuge hinweg.

Neben der Entkopplung auf der Zeitachse wurde auch eine Entkopplung innerhalb eines Fahrzeuges durch unterschiedliche Polarisierungen vorgeschlagen.

2.5 Polarisation

Generell besteht weitgehend Einigkeit, Polarisation zur Trennung von Radarsignalen unterschiedlicher Sensoren nicht als Option zur Standardisierung vorzuschlagen bzw. zu empfehlen. Die Wahl der Sensorpolarisation bleibt dem Sensorhersteller in Abhängigkeit von den Wünschen der Fahrzeughersteller überlassen.

Sensoren mit sehr breitem FoV (also SRR) bevorzugen typischerweise eine horizontale Polarisation, da sonst bei vertikaler Polarisation und großen Winkeln eine hohe Dämpfung den FoV einschränken würde.

Des Weiteren können mit Hilfe von Polarisation nur zwei Sensoren vollständig voneinander entkoppelt werden, da die orthogonale Polarisationsbasis nur zwei Freiheitsgrade hat [IMIKO-AP2.2, Abschnitt 4.3].

2.6 Übertragung von Verfahren aus dem Mobilfunk

Die direkte Übertragung von Interferenz-Minderungsmaßnahmen aus heutigen Kommunikationssystemen wie z.B. bei 4G oder 5G Mobilfunk ist aus verschiedenen Gründen nicht möglich:

- Bei den Mobilfunksystemen sind einheitliche Standards die Grundlage für die Darstellung der Grundfunktion der Kommunikation über Herstellergrenzen hinweg. Für die Interferenzvermeidung wird insbesondere auf die Zuweisung bzw. Inanspruchnahme von Frequenzkanälen und Zeitschlitzten mit festen Größen gesetzt.
- Wesentlicher Bestandteil bei Mobilfunksystemen ist die Synchronisation auf gemeinsame Zeit- bzw. Frequenzschlitze, die einen wesentlichen Anteil am Aufwand darstellt. Dies ist bei automotiven Radaren bisher nicht vorhanden bzw. nur sehr eingeschränkt, wie in Sensornetzen innerhalb eines Fahrzeugs.
- Bei einem Automotive-Radarsensor ist die Grundfunktion ohne gemeinsame Standards erreichbar und unterschiedliche Technologien differenzieren die Wettbewerber im Markt. Der gemeinsame Rahmen ergibt sich direkt aus der jeweiligen Frequenzregulierung, die bislang keine Interferenz-Mitigierungsmaßnahmen vorschreibt.
- Bei einem Automobil-Radarsensor ergeben sich wesentliche Modulationsparameter aus den Anforderungen der jeweiligen Fahrfunktion (siehe auch [IMIKO-AP1.1] bzw. [IMIKO-AP2.3 Abschnitt 2]). Z.B. hat das automatisierte Einparken andere Anforderungen als eine ACC (adaptive cruise control) Funktion.

- Damit sind die Modulationsparameter abhängig von Fahrfunktion, Szenario und Geschwindigkeit. Somit führt die Verwendung von festen Zeitschlitzten und Frequenzkanälen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Performanceverluste auch im nicht-gestörten Fall.

3 Erklärung und Zusammenfassung der kooperativen Interferenzminderung

Im Folgenden werden die Grundlagen der kooperativen Interferenz-Minderungsmaßnahmen vorgestellt und die wesentlichen Anforderungen dargelegt.

3.1 Ansatz für kooperative Interferenzminderung

Die Kooperationsmethoden beruhen auf dem Verfügbarmachen von Vorwissen bzw. Hilfsinformationen für effizientere Mitigierungsmethoden durch:

- Einsatz von zusätzlicher Rechenzeit/Speicherplatz/Rechenressourcen
- Einsatz von zusätzlichen Sensor-externen HW-Komponenten (z.B. Kompass oder Car-2-x-Kommunikationsmodul)
- abgestimmte Algorithmen
- Vermeidung von Frequenz-/Zeit-Ressourcen-Verschwendung.

Im Projekt wurden verschiedene Stufen der Kooperation identifiziert (siehe Bild 1). Der wesentliche Unterschied zwischen der schwachen und der starken Kooperation ist die explizite Verwendung von Datenkommunikation (z.B. vehicle to vehicle communication oder Mobilfunkanbindung) zur Übermittlung von Sensorparametern bei der starken Kooperation, wohingegen bei der schwachen Kommunikation ein Satz von Regeln zur Interferenzminderung etabliert wird, der ohne explizite Datenkommunikationsanbindung für die Sensoren auskommt.

Die sensorseitigen kognitiven und agilen Fähigkeiten eines Radar-Sensors, auf die eine Interferenzminderungs-Strategie zurückgreifen kann, werden in [IMIKO-AP2.2] näher beschrieben. Im Sinne einer Übersicht zeigt Bild 3 ein Blockschaltbild, in dessen Zentrum die Interferenzminderungs-Strategie steht. Durch die gestrichelten Signalwege werden die verschiedenen Eingriffsmöglichkeiten der Interferenzminderungsstrategie auf die Parameter der Sensorhardware gekennzeichnet.

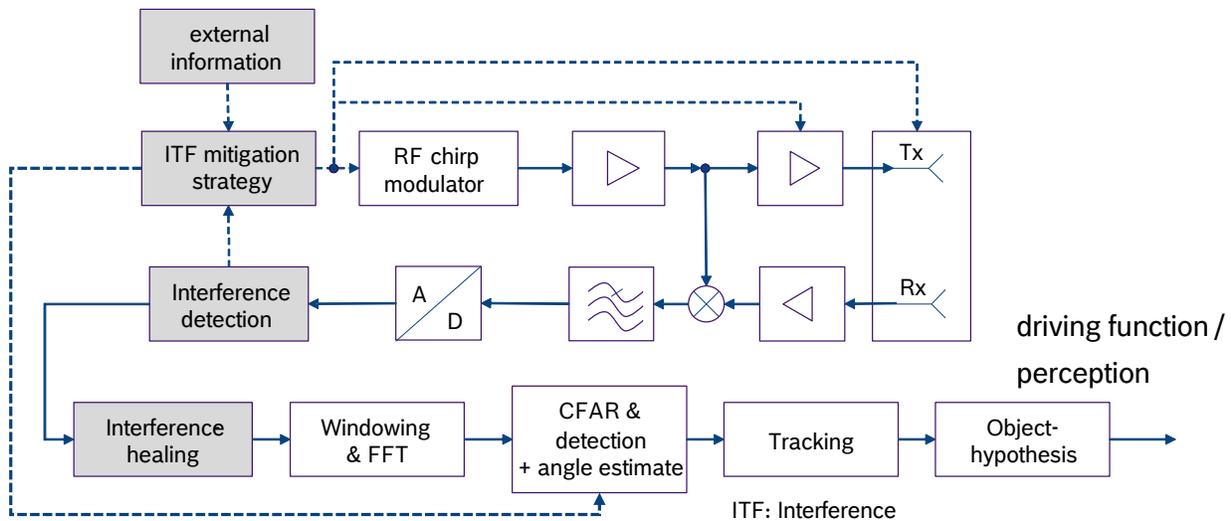


Bild 3 Blockschaltbild eines homodynen, Frequenz-Rampen basierten Radar-Sensors mit auf der Sendeseite wirksamer Interferenz-Minderungsstrategie. Die gestrichelten Signalpfade stellen unabhängige Optionen dar [IMIKO-AP2.2].

Die Methoden der schwachen Kooperation wurden in [IMIKO-AP2.3] erarbeitet und dargestellt.

Dort hat auch bereits eine erste Vorauswahl anhand einer Vorbewertungsmatrix in der zeitlichen Mitte des Projektes IMIKO-Radar stattgefunden. Im Folgenden werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur noch die vor-ausgewählten Verfahren behandelt.

Die Methoden der starken Kooperation wurden in [IMIKO-AP3] erarbeitet und dargestellt.

In [IMIKO-AP1.3] wurden umfassende Anforderungen an kooperative Interferenzminderungsmaßnahmen formuliert. Im Folgenden werden die wichtigsten bzw. die zusammenfassenden Anforderungskategorien dargestellt. Für die Bewertung spielt insbesondere die Einordnung des Nutzens, d.h. der Wirksamkeit im Zusammenhang mit dem dafür notwendigen Aufwand eine Rolle.

3.2 Anforderungen bzgl. Wirksamkeit und Nutzen der Methoden

Den Nutzen einer Maßnahme betreffen u.a. folgende Anforderungen:

- Wirksamkeit bzgl. False Positives, False Negatives und SNR [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.1]
- Keine Verschlechterung der Sensor Performance bei Anwendung der Methode, wenn keine Interferenz vorhanden ist [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.4] im Vergleich zur Nichtanwendung der Methode.
- Geringe Latenzzeiten für schnell veränderliche Interferenzszenarien [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.2]
- Gleichberechtigte Behandlung der Sensoren [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.4.4]

3.3 Anforderungen bzgl. Aufwand für die Methoden

Im Folgenden werden die Kriterien aus [IMIKO-AP1.3] dargelegt, die den Aufwandsaspekt einer Maßnahme betreffen.

Aufwände können entstehen bzgl. der/des

- Analogen Sensorhardware z.B. HF-Frontend und Antennen [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.3]
- Digitalen Sensorhardware z.B. Digitale Signalverarbeitungs-komponenten [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.3]
- Anforderungen an Verifikation und Testing [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.6]
- Validierung [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.6]
- Standardisierung: komplexe Verfahren sind schwieriger zu standardisieren als einfache Verfahren [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.6]. Methoden, die z. B. Regulierungs-Änderungen benötigen, können einen hohen Implementierungsaufwand mit sich bringen, insbesondere wenn eine weltweite Umsetzung angestrebt wird.
- Intellectual Property: Lizenzzahlungen würden ein großes Hindernis darstellen [IMIKO-AP1.3, Abschnitt 4.9]
- Aufwandes bzgl. „Sensor-Zeit“ für die Verfahren, die die zur Verfügung stehende Messzeit einschränken bzw. die Updaterate des Sensors verringern
- Aufwände für erhöhte Systemflexibilität für Interferenz-optimierte Messzeiten.

4 Diskussion und Bewertung der Schwachen Kooperation

Die tatsächliche Wirksamkeit der Verfahren zur Interferenzminderung in einer gegebenen Szene hängt immer auch von der Verfügbarkeit freier Ressourcen oder Farben (im Sinne der Graphen-theoretischen Behandlung der Interferenz in [IMIKO-AP3]) ab. D.h. in einer Szene, in der keine freien Ressourcen mehr vorhanden sind, wird der beste Ressourcen-Verteilalgorithmus keine signifikante Verbesserung mehr erbringen können. Daher sollte jeder Sensor nur so viele Ressourcen belegen, wie für die Erfüllung seiner Funktion notwendig ist. Umgekehrt ist die Verfügbarkeit von ausreichenden Ressourcen (insbesondere Frequenzspektrum) und die effiziente Nutzung derselben von hoher Bedeutung.

Innerhalb von Szenarien mit freien Ressourcen ist die sinnvolle Verteilung dieser auf die Sensoren ein Qualitätsmerkmal, dass sich in der Wirksamkeit des Verfahrens messbar niederschlägt.

4.1 Zufälliger Frequenzwechsel

Der zufällige Frequenzwechsel wird in [IMIKO-AP2.3, Abschnitt 4.1] beschrieben. Hierbei wird die Mittenfrequenz nach Einhaltung einer Wartezeit gewechselt. Die Wartezeit von mindestens 100ms umfasst ca. 2 - 3 Messzyklen. Es sind hierbei verschiedene Ausprägungen möglich: Die Wahl der Frequenz kann zufällig (nicht vorhersagbar) oder deterministisch, d.h. vorhersagbar also pseudozufällig erfolgen.

Wegen der besseren Test- und Validierbarkeit wurde im Rahmen von IMIKO-Radar die deterministische, pseudozufällige Variante bevorzugt. Entsprechend dem Vorschlag in [IMIKO-AP2.3, Bild 4] wird das Frequenzband abhängig von der individuellen Modulationsbandbreite in eine ganze Zahl nicht überlappender Kanäle unterteilt, die mittels einer auf einem Kongruenzgenerator beruhenden Sprungfolge angesteuert werden. Bzgl. der Auswahl der Zufallsfolge sind hier auch andere Generatorprinzipien denkbar.

Die für jeden Sensor individuellen Kanäle erlauben eine hohe Flexibilität bei der Wahl der eigenen Modulationsbandbreite.

4.1.1 Erkenntnisse zur Wirksamkeit

Der zufällige Frequenzwechsel (Random Hopping) lässt Signalkollisionen auch bei ausreichenden Frequenzressourcen noch zu.

In den Simulationen der Universität Ulm zeigt sich für den zufälligen Frequenzwechsel bezüglich Rauscherhöhung im Autobahnzenario eine Verbesserung ggü. dem sogenannten "original case" in dem die Radare in ihrer mehr oder weniger zufälligen Standardeinstellung verbleiben. Diese Verbesserung ist im Kreuzungsszenario weniger deutlich. Universität Ulm bewertet das Random Hopping als im Rahmen der statistischen Aussagekraft der Simulationen als gut wirksam wobei die Kompassmethode jedoch besser abschneidet (siehe Bild 7 und Bild 9 in Abschnitt 11.1.). Für breitbandige Störer ist die Wirksamkeit stark reduziert.

In den vereinfachten Simulationen in einem abstrahierten Szenario mit zufällig verteilten Radarsensoren ergibt sich für das Random Hopping eine Verminderung der Interferenzleistung um ca. 7dB ggü. dem sogenannten „bad case“, bei dem alle Sensoren die gleiche Mittenfrequenz haben, siehe Bild 17 in Abschnitt 11.2.

Es ist klar zu vermerken, dass die Wirksamkeit mit der zur Verfügung stehenden Bandbreite (und damit der Anzahl der nutzbaren Kanäle) skaliert. Gleichfalls ist die Frequenzverteilung der Störer von Bedeutung. Bei den Simulationen war die Frequenzverteilung der Störer anders als bei den Messungen. Deswegen zeigen die Ergebnisse Unterschiede bzgl. Wirksamkeit der Methode.

4.1.2 Einschätzung Aufwand

Der wesentliche Aufwand des zufälligen Frequenzwechsels entsteht hinsichtlich der Frequenz-Agilität des Hochfrequenz-Frontends inkl. der Antennen. Für LRR Sensoren mit stark fokussierten Antennen kann dies zu einem signifikanten Mehraufwand je nach verwendeter Antennentechnologie führen. Wenn man die Frequenz-Agilität des Sensors als vorhanden voraussetzt, so ist die zufällige Frequenzwahl die aufwandsgünstigste Methode.

Für ein sinnvolles Ausweichen im Frequenzbereich ist der entsprechende Aufwand für die Homologation (Zulassungsprozesse für die jeweiligen Zielmärkte) zu beachten. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, ist die zukünftige Verfügbarkeit eines durchgängigen Frequenzbandes von 76-81 GHz eine wichtige Grundlage für das Verfahren.

4.2 Fahrtrichtungsabhängiger Frequenzwechsel (Kompassmethode)

Die grundlegende Idee ist, dass die Frequenz abhängig von der Blickrichtung des Sensors in Welt-Koordinaten so gewählt wird, dass eine direkte Line-of-Sight Interferenzsituation vermieden wird.

Der fahrtrichtungsabhängige Frequenzwechsel wird in [IMIKO-AP2.3, Abschnitt 4.5] in der Variante kontinuierliche Frequenzanpassung und in [IMIKO-AP2.3, Abschnitt 4.6] Frequenzanpassung in diskreten Kanälen beschrieben, siehe auch [WO21069180], [WO2021165262A1] und [WO2021219480]. Hierbei ist wie beim zuvor beschriebenen Random-Hopping die Bandbreite der Kanäle individuell abhängig von der jeweiligen Modulationsbandbreite des Sensors.

4.2.1 Erkenntnisse zu Wirksamkeit bzw. Nutzen

In den Simulationen der Universität Ulm zeigt sich die Kompassmethode als das wirksamste der betrachteten Verfahren im Kreuzungsszenario der schwachen Kooperation, siehe Bild 9 in Abschnitt 11.1. Auch im Highway Szenario ist die Wirksamkeit hoch (siehe Bild 7). In der Simulation werden auch LRR Sensoren betrachtet, die an der Kompassmethode nicht teilnehmen, diese schmälern in der Mischbetrachtung die Wirksamkeit (siehe Abschnitt 11.1).

In den vereinfachten Simulationen in einem abstrahierten Szenario mit zufällig verteilten Radarsensoren ergibt sich für die Kompassmethode eine Verminderung der Interferenzleistung um bis zu 16dB ggü. dem „bad case“, siehe Bild 17 in Abschnitt 11.2.

In den Labor-Messungen in AP4 (siehe Anhang Abschnitt 12) zeigt sich die Kompassmethode im Fall der schmalbandigen Störer als wirksam bezogen auf die maximale und mittlere Rauscherhöhung, wobei die Vorteile ggü. dem „original case“ (Standardeinstellung der Radare) nicht so deutlich hervortritt, wie in der Simulation. Dies wird damit begründet, dass in der Messung weniger Störer präsent sind als in der Simulation. Die Auswertung in Bild 23 und Bild 24 zeigt aber dennoch die Kompassmethode in Bezug auf die maximale und mittlere Rauscherhöhung als das wirksamste Verfahren.

Die Wirksamkeit dieser Methode verschlechtert sich, wenn das Azimut-FOV des Radarsensors zunimmt. Dadurch würde ein großer Winkelbereich mit einem konstanten Frequenzband definiert. Die Integration zusätzlicher Sensoren, deren Azimut-FOV sich überschneidet, würde erschwert.

4.2.2 Einschätzung Aufwand

Da diese Methode ebenfalls das Ausweichen in Frequenzrichtung zur Grundlage hat, entsteht auch hier ein Aufwand bzgl. der Frequenz-Agilität des Hochfrequenz-Frontends inkl. der Antennen. Wie schon in Abschnitt 4.1.2 ausgeführt kann dies für LRR Sensoren mit stark fokussierten Antennen zu einem signifikanten Mehraufwand führen. Wenn man die Frequenz-Agilität des Sensors als vorhanden voraussetzt, so benötigt die Kompassmethode ggü. der zufälligen Frequenzwahl zusätzlich die Information der Blickrichtung des Sensors in Welt-Koordinaten. Es ist davon auszugehen, dass diese Information in vielen Fahrzeugen über das Fahrzeug-interne Netzwerk zur Verfügung stehen wird, da moderne Fahrzeuge bereits über GNSS Empfänger für die Bereitstellung von Navigations-Funktionalität oder auch E-Call verfügen. In diesem Fall muss nur eine entsprechende Datenverbindung über den Fahrzeugbus vorgesehen werden. Für eine Stand-alone-Lösung stehen prinzipiell auch elektronische Erdmagnetfeldsensoren zur Verfügung, die allerdings einen zusätzlichen Hardware-Aufwand darstellen. Somit ist der Aufwand der Kompassmethode etwas höher als der der pseudozufälligen Frequenzwahl.

Die beschriebenen Herausforderungen für LRR bezüglich Antennenoptimierung würden entsprechend wegfallen, wenn diese von Kompassmethode ausgenommen wären, siehe Vorschlag in [IMIKO-AP2.3, Abschnitt 4.6], bei dem die Kompassmethode nur für MRR/SRR Sensoren im Frequenzbereich 77-81 GHz Anwendung findet.

Mit der Modifikation der Kompassmethode und der Definition erweiterter störungsabhängiger Bandbreite [IMIKO-AP2.3, Abschnitt 4.6] ergeben sich zusätzliche Freiheiten zum Ausweichen gegenüber nicht kooperativen Radaren oder erhöhtem Bandbreitenbedarf bei Szenarien mit gleichzeitig geringer Sensordichte.

Für ein sinnvolles Ausweichen im Frequenzbereich ist der entsprechende Aufwand für die Homologation (Zulassungsprozesse für die jeweiligen Zielmärkte) zu beachten. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, ist die zukünftige Verfügbarkeit eines durchgängigen Frequenzbandes von 76-81 GHz eine wichtige Grundlage für das Verfahren.

4.3 Zufälliger Timingwechsel

Der zufällige Timingwechsel wird in [IMIKO-AP2.3, Abschnitt 4.2] beschrieben. Hierbei sind folgende Varianten zu unterscheiden: Die Art der zufällig eingefügten Pausen kann nicht-deterministisch oder deterministisch, also pseudozufällig erfolgen. Es können kurze Pausen (d.h. z.B. $<100\mu\text{s}$) eingefügt werden, um eine Entkopplung von gleich laufenden Frequenzrampen zu erzielen, oder längere Pausen (d.h. z.B. $<25\text{ms}$) um eine Entkopplung über den Duty-Cycle des Messzyklus zu erhalten.

4.3.1 Erkenntnisse zu Wirksamkeit bzw. Nutzen

In den Simulationen der Universität Ulm ist der zufällige Timingwechsel im Highway Szenario (siehe Bild 7) gut wirksam, im Kreuzungsszenario ist diese Wirksamkeit reduziert.

Bei den Messungen zeigt sich eine vorhandene Wirksamkeit der Methode, die z.T. besser als die des Random Frequency Hopping ist. Allerdings sind die Messszenarien dadurch gekennzeichnet, dass nur relativ wenig Störer präsent sind. In den Simulationen hingegen ist eine hohe Anzahl von Störern vorhanden und die Ressource Zeit ist damit schnell aufgebraucht. Dies erklärt den Unterschied zwischen Messung und Simulation. Allerdings zeigen die Messungen für die Auswertung mit breitbandigen Störern für das Timing Verfahren die höchste Wirksamkeit (siehe Bild 29 und Bild 30), da hier die Ressource Zeit genutzt wird und nicht die nicht mehr vorhandene Ressource Frequenz.

Die Zeitachse wird schon oft innerhalb eines Fahrzeugs zur Entkopplung der mehreren Sensoren verwendet, wo sich das Timing der Sensoren aufgrund der vorhandenen Busleitungen besser kontrollieren lässt. Damit ist die Ressource Zeit oft schon verbraucht, ohne dass noch eine sinnvolle zeitliche Entkopplung der Sensoren anderer Fahrzeuge möglich ist.

4.3.2 Einschätzung Aufwand

Eine tatsächlich wirksame Entkopplung über die Wahl des Timings erscheint nur bei hinreichend gleichen Zykluszeiten und Duty-Cycles erreichbar. Dies stellt aufgrund der unterschiedlichen Funktionsanforderungen an die Sensoren in verschiedenen Fahrzeugen einen massiven Aufwand bzgl. einer Standardisierung aller vorkommender Sonderfälle dar. Für die Synchronisierung von Sensoren über verschiedene Fahrzeuge hinweg, wäre die Ableitung eines Basistaktes aus einer globalen Zeitreferenz (z.B. GNSS-Zeit) notwendig, die nicht in allen Fahrzeugen vorausgesetzt werden kann.

Für die einfachste Variante der zufälligen Zeitverschiebung ergibt sich ein Zusatzaufwand durch das Entstehen von nicht-äquidistanten Abtastzeiten für die nachgelagerte Signalverarbeitung bzgl. Objekt-Hypothese und Objekt-Verfolgung (Tracking). Dies erhöht dort den notwendigen Prozessieraufwand.

4.4 Analyse before Measure

Das Verfahren „Analyze before Measure“ (AbM) wird in [IMIKO-AP2.3, Abschnitt 5.2] beschrieben. Die Grundidee hierbei ist, dass der Radarsensor die verfügbaren Ressourcen, insbesondere das zur Verfügung stehende Frequenzband analysiert und dann die bzgl. der Interferenz günstigste Fläche in der Zeit-Frequenz-Ebene auswählt. Hierbei darf „Analyze before Measure“ nicht mit dem aus der Kommunikation bekannten „Listen before Talk“ (LbT) verwechselt werden: Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass es bei LbT zu einer Blockade des Sensors kommen kann. Dies wird bei AbM ausgeschlossen; die Radarmessung wird auf jeden Fall durchgeführt.

Es werden verschiedene Varianten unterschieden: Zum einen die Verwendung eines komplett unabhängigen Analyse-Empfangs-Pfades oder zum anderen die Nutzung des vorhandenen Radar-Empfangspfades während der Sendepause entsprechend dem Duty-Cycle des Sensors.

4.4.1 Erkenntnisse zu Wirksamkeit bzw. Nutzen

Die Implementierung von „Analyze before Measure“ in der Simulation der Universität Ulm war aus Aufwandsgründen nicht möglich. Ein Beispiel-Messergebnis ist in Anhang 12.2 dargestellt.

Demnach führt das Verfahren „Analyze before Measure“ zu einer Verringerung der Interferenz-Auswirkungen gegenüber „No Mitigation“ und gegenüber „Frequency Hopping“. Aus grundlegenden Abschätzungen heraus wird erwartet, dass der Nutzen von „Analyze before Measure“ vergleichbar oder etwas besser als bei der Kompassmethode ist, da starke Interferenz möglichst vermieden wird. Überlappungen in der Zeit-Frequenzebene sind aber nicht auszuschließen, da das Vorhandensein geeignet großer freier Bereiche nicht vorausgesetzt werden kann.

4.4.2 Einschätzung Aufwand

Die Verwendung von „Analyze before Measure“ stellt auf jeden Fall einen Zusatzaufwand dar. Auch wenn der Empfangspfad des Radars in der Sendepause mit genutzt werden kann, so werden zusätzliche Ressourcen an Speicher und Prozessor-Leistung benötigt.

Für ein sinnvolles Ausweichen im Frequenzbereich ist der entsprechende Aufwand für die Homologation (Zulassungsprozesse für die jeweiligen Zielmärkte) zu beachten. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, ist die zukünftige Verfügbarkeit eines durchgängigen Frequenzbandes von 76-81 GHz eine wichtige Grundlage für das Verfahren. Dieser Aufwand ist dem Aufwand für einen Wechsel im Zeitbereich vorzuziehen, siehe Methode des zufälligen Timingwechsels.

4.5 Sofortige Chirp Unterbrechung bei Interferenz

Das Verfahren ist in [IMIKO-AP2.3, Abschnitt 5.3] beschrieben. Die Grundidee ist, die eigene Aussendung innerhalb einer Rampe zu unterbrechen, wenn Interferenz von außen detektiert wird.

4.5.1 Erkenntnisse zu Wirksamkeit bzw. Nutzen

Das Verfahren kann bei hohem Interferenzgrad, als einzelne Maßnahme betrachtet, wie die Interferenz selbst, zu einer Blockade des Sensors von außen führen. Die Ressourcenaufteilung würde in diesem Fall einseitig zu Lasten des unterbrechenden Sensors gehen. Im ungünstigsten Fall unterbrechen mehrere Sensoren ihre Aussendung und die Ressource bleibt ungenutzt. Für den die Maßnahme anwendenden Sensor ist es jedoch irrelevant, ob aufgrund der Störung selbst oder aufgrund der Abschaltung keine

Ergebnisse aus der Signalverarbeitung gewonnen werden können. Der Störer selbst wird allerdings in diesem schlimmsten Fall nicht mehr gestört. Somit wird durch die Methode die Ressourceneffizienz erhöht. Der Fall, dass mehrere Sensoren, die sich gleichzeitig überlagern, die Aussendung unterbrechen kann durch geeignete Verfahren zur Kollisionsvermeidung minimiert werden. Durch diese Verfahren kann auch eine Gleichverteilung der Abschalttrate zwischen kooperativen Sensoren erreicht werden. Geeignete Verfahren sind beispielsweise ein pseudozufälliges Abschalten oder ein um eine randomisierte Zeit verzögertes Abschalten, falls der Störer noch detektiert wird. Des Weiteren wäre auch die Festlegung und Verteilung eines Abschaltplans – also welcher Sensor bei welcher Kollision abschaltet – als eine starke Kooperation denkbar. Es wird kontrovers diskutiert, ob durch die Blockade nur eine ohnehin nicht zu verwertende Messung verhindert wird, oder ob es auch zur Blockade von zwar gestörten aber noch sinnvoll prozessierbaren Messungen kommen kann. Die Methode hat keinen Nutzen für den Einzelsensor, sondern einen Nutzen für die gesamte Technologie, bei entsprechender Verbreitung im Feld. Die Abhängigkeit des Nutzens von der Verbreitung im Feld existiert auch für einen Großteil der anderen kIMM. Bei gleichverteilter Anwendung dieser Methode durch zwei sich störender Sensoren in einem Szenario wird die Anzahl der Chirp-Unterbrechungen im besten Fall bei beiden Sensoren um 50% reduziert. Es liegen keine Erkenntnisse aus speziellen Simulationen oder Messungen vor.

4.5.2 Einschätzung Aufwand

Das Verfahren benötigt spezielle, noch zu entwickelnde Hardware, die beispielsweise ein schnelles Schalten des Sendeverstärkers ermöglicht. Die Detektion von Interferenz ist typischerweise mit Verzögerungszeiten behaftet. Für das vorgeschlagene Verfahren müsste eine sehr schnelle digitale Interferenzdetektion implementiert werden. Die Prozessierung teilweise unterbrochener Chirps erfordert zusätzliche Signalverarbeitungsressourcen. Dieser Mehraufwand in der Signalverarbeitung entspricht dem Mehraufwand für aktuelle Detect und Repair Verfahren.

5 Diskussion und Bewertung Methoden „Starke Kooperation“

In diesem Arbeitspaket werden Aspekte und Konzepte der starken Kooperation diskutiert. Die starken kooperativen Interferenzminderungsmaßnahmen (kIMM) unterscheiden sich von den schwachen durch die Verwendung eines expliziten Kommunikationskanals. Über diesen Kommunikationskanal können relevante Parameter zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden, um die verfügbaren Ressourcen so effizient zuzuweisen, dass potenzielle Interferenzen vermieden oder reduziert werden. Aufgrund der Komplexität der Lösungen und der verfügbaren Ressourcen wurden die Ansätze für eine starke Kooperation nur stark vereinfacht simuliert oder demonstriert. Unabhängig davon ist die Einsatzmöglichkeit der starken kIMM auch zeitlich nicht absehbar, da eine vollständig stabil funktionierende V2X-Infrastruktur erforderlich ist. Das Potenzial einer starken gegenüber einer schwachen kIMM wird in Bild 18 gezeigt. Im Median ist eine ideale starke kIMM ca. 7dB besser als die Kompassmethode. Die Kombination von Kommunikations- und Radarfunktionalität im selben Frequenzkanal wurde in diesem Arbeitspaket nicht behandelt. Aus regulatorischer Sicht ist die Nutzung der Frequenzbänder 24,05-24,25 GHz und 76-81 GHz für Kommunikation Stand heute nicht zulässig.

5.1 Gegenüberstellung zentraler und dezentraler Ansatz

Das Kommunikationsnetz, das aus mobilen Knoten oder Fahrzeugen besteht, wird als Vehicular Ad Hoc Network (VANet) bezeichnet. Die Netztopologie kann zentralisiert oder dezentralisiert sein. Beim ersten Ansatz wird ein zentrales Gerät für die Weiterleitung der Nachrichten zwischen den Netzknoten

zuständig sein. Dieses Gerät kann auch für die Planung und Zuweisung der Ressourcen verwendet werden. Eine wichtige offene Frage ist, wer für die Entwicklung und Wartung dieses Geräts verantwortlich wäre. Ein wichtiger Vorteil eines zentralisierten Ansatzes ist, dass der abgedeckte Raum größer ist als bei einem dezentralisierten Ansatz.

Ein zentralisierter Ansatz bedeutet zusätzliche Kosten für die Infrastruktur und wäre nur dort verfügbar, wo auch die V2X-Infrastruktur vollständig eingerichtet ist.

5.2 Mittelstarke versus starke Kooperation

Bei mittelstarken und bei starken kIMMs werden detaillierte Informationen über die verwendeten Radarmodulationen per Kommunikation ausgetauscht. Im ersten Fall ist die genaue Art der Verarbeitung dieser Informationen den einzelnen Radarherstellern überlassen. Im zweiten Fall ist die Prozessierung der Information bei allen Radarsensorsystemen gleich. Eine mögliche Implementierung der mittelstarken kIMMs wäre in kürzerer Zeit realisierbar als die Methoden der starken Kooperation, da weniger Abstimmung über algorithmische Details notwendig ist. Darüber hinaus können Sensorhersteller und Fahrzeughersteller bestimmte Parameter an ihre Applikationen in Abhängigkeit zu bestimmten Verkehrsszenarien anpassen.

5.3 Allgemeine Einschätzung Aufwand

Der HW-Aufwand ist relativ groß, da ein Kommunikationsgerät und ein GNSS-Gerät für Positionierung und Zeitmessung benötigt werden. Diese beiden Elemente werden jedoch in mehreren Fahrzeugarchitekturen für autonomes Fahren und künftige Fahrerassistenzsysteme benötigt. Die Anforderungen an Datensicherheit und funktionale Sicherheit sollen bei jeder Implementierung erfüllt werden.

Eine schwache Kooperation ist einer starken und mittleren Kooperation vorzuziehen, wenn die Latenzzeit oder Reaktionszeit auf ein zeitkritisches Interferenzszenario minimiert werden soll. Das Potenzial einer starken Kooperation liegt jedoch in einer frühzeitigen Erkennung der Interferenzsituation und der entsprechenden Aktivierung eines geeigneten Vermeidungsverfahrens. Im schlimmsten Falle werden die Sensoren deaktiviert und eine Warnung ausgelöst.

Eine Kombination aus schwachen und starken kIMM ist dann empfehlenswert, um eine schnelle Reaktionszeit und frühzeitige Planung zu ermöglichen.

Die erforderliche Agilität der Sensoren hängt von dem Ausweichverfahren ab (siehe Verfahren der schwachen Kooperation in Kapitel 4). Es ist jedoch wichtig, dass genügend Ressourcen (Frequenzbänder, Zeit, ggf. Codes) zur Verfügung stehen, um den Ressourcenbedarf für möglichst viele Radargeräte in dem relevanten Raum zu decken. Eine optimale Ressourcenzuweisung unter Berücksichtigung der unterstützten Anwendungen und für den Fall, dass nicht genügend Ressourcen zur Verfügung stehen ist eine Herausforderung für die künftige Entwicklung von starken kIMM. Für solche Aufgaben kann eine größere Rechenleistung bei dem zentralen Gerät geplant werden, wenn das benötigt wäre.

Um die eher ungünstigen Latenzzeiten der Kommunikationssysteme für V2V aufzufangen, muss die Planung der Minderungsmaßnahmen entsprechend weit in die Zukunft erfolgen.

Die Definition einer neuen V2X-Nachricht, eines neuen Dienstes oder einer neuen Anwendung sowie einer Implementierungsstrategie innerhalb der V2X-Kommunikation zum Zwecke der

Interferenzvermeidung erfordert einen hohen Koordinationsaufwand zwischen OEMs, Tier1s und Standardisierungsgremien.

5.4 Modified Radar Mac

Dieses Verfahren ist eine konzeptionelle Weiterentwicklung des in [RadarMac] vorgestellten Verfahrens. Dabei handelt es sich um eine zentralisierte und stark kooperative Methode, bei der das Fahrzeug z.B. über einen LTE-Link mit einer Zentrale verbunden ist. Jedes Fahrzeug sendet periodisch seine aktuelle Position, Orientierung und Route an dieses Gerät. Das Fahrscenario wird auf der Grundlage eines Interferenzmodells analysiert. Dann wählt der RF-Ressourcenplanungsalgorithmus einen Modulationsparametersatz aus einer geordneten Liste aus. Diese Prozeduren werden im Dispatch Center durchgeführt. Um die Latenzzeiten der Kommunikation zu überwinden, muss diese Optimierung für ca. 0,5 bis 1s in der Zukunft erfolgen. Der Planungsalgorithmus basiert auf einem Graph-Coloring-Ansatz, bei dem jedes Radar ein Knoten ist, eine Kante die geschätzte Interferenzstärke darstellt und eine Knotenfarbe einen Parametersatz aus der oben genannten Liste repräsentiert. Das Problem der Einstellung der Parameter reduziert sich auf die dynamische Einfärbung eines zeitlich veränderlichen Graphen. Ein wesentlicher Nachteil des in [RadarMac] beschriebenen Verfahrens ist, dass alle Radare identisch parametrierbare Modulationen haben müssen. Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Fahrfunktionen und Fahrfunktions-abhängigen Zustände eines Sensors nicht möglich. In [IMIKO-AP3] wird ein Vorschlag gemacht, der die verschiedenen und unterschiedlichen Möglichkeiten der verschiedenen Radare bei der Optimierung berücksichtigt. Die wichtigsten Änderungen an diesem Konzept, die in diesem Arbeitspaket vorgeschlagen werden, bestehen darin, dass die verwendete Verbindung die V2X-Verbindung ist und das Interferenzmodell auf omni-direktionalen Antennen basiert. Das wiederum bedeutet, dass der einzige benötigte Parameter der absolute Standort des Fahrzeugs und die Montageposition des Radars ist. Die Herausforderung besteht hier darin, eine praktikable Liste der zu verwendenden Parametersätze zu finden. Eine Möglichkeit ist die Verwendung der gleichen Frequenzbänder wie bei der diskretisierten Kompassmethode.

5.4.1 Einschätzung Aufwand

Dieses Verfahren verspricht eine sehr hohe Wirksamkeit durch eine starke Optimierung. Allerdings erscheint der Aufwand für Standardisierung und zentrale Implementierung enorm hoch. Eine zentrale Steuerung muss in Hardware und Software entwickelt werden. Ihre Wartung und Pflegemüssen geplant und durchgeführt werden. Die flächendeckende Verfügbarkeit hinreichend breitbandiger Kommunikationskanäle für diese Aufgabe stellt eine weitere Herausforderung dar. Deswegen ist die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit nicht absehbar. Zusätzlich sollten sich alle OEMs und Tier1s weltweit oder zumindest innerhalb von Ländern oder Regionen auf Standardmodulationsverfahren einigen. Dies würde die Differenzierung zwischen verschiedenen Radaranwendungen und Sensoren zunichtemachen.

5.5 Radar Netzwerk mit zentralem Server

Dieses Konzept unterscheidet sich von der modifizierten Radar-MAC-Methode im Wesentlichen nur in der Zuweisung der HF-Ressourcen. Hier stellen die Netzknoten dem Zentralrechner Parametersätze zur Verfügung, die der Planungsalgorithmus dann auswählen und zuweisen kann. D.h. eine vorab geordnete Liste von Parametersätzen wird hier nicht benötigt. Diese Eigenschaft verwandelt die oben genannte Methode in eine mittelstarke KIMM, indem sie ein in einem bestimmten Maße nicht standardisiertes,

aber flexibles Wellenformdesign ermöglicht. Eine künftige Aufgabe wird die Definition der Randbedingungen für kommende Modulationsverfahren sein.

5.5.1 Einschätzung Aufwand

Dieses Verfahren hat fast die gleichen Aufwände wie die modifizierte Radar-MAC-Methode, aber es entfällt die Notwendigkeit, starre Standardmodulationsschemata zu finden. Auf diese Weise wird eine Differenzierung zwischen verschiedenen Radaranwendungen und Sensoren ermöglicht. Dennoch sollten die von verschiedenen Radarsensoren verwendeten Wellenformen sich nicht gegenseitig stören. Das erfordert zumindest einen Koordinationsaufwand zwischen allen Beteiligten.

Zusätzlicher Rechenaufwand entsteht, da keine vorab geordnete Liste zur Verfügung steht, und der Zentralrechner diese nach jedem Einstellzyklus überprüfen und ermitteln soll

5.6 Kognitives Radar mit Kommunikationsfähigkeit

In diesem Konzept handelt es sich um eine mittelstarke KIMM mit einer dezentralisierten Topologie [IMIKO-AP3]. Der jeweilige Sensor entscheidet selbst auf der Basis seiner proprietären Programmierung, wie er mit der Interferenzsituation in seiner jeweiligen Fahr-Szene umgeht. Er empfängt und sendet aber Interferenz-relevante Daten, inkl. der von ihm bzw. anderen analysierten Interferenz. Damit wird dem Sensor ein höchstes Maß an Eigenständigkeit bei gleichzeitig maximiertem Vorwissen ermöglicht. Jedes Radarsystem soll aus V2X-Nachrichten, der Analyse der empfangenen Radarsignale und vorhandene Informationen aus anderen Quellen im Fahrzeug die Fahrscenarien analysieren. Beispielsweise kann in einem Parkszenario auf einen Interferenzgraphen wie in [RadarMAC] reagiert werden, der aus den für diesen Zweck konzipierten V2X-Nachrichten und dem Ergebnis der Interferenzerkennung im eigenen Radarsignal erstellt wird. Eine mögliche Reaktion könnte darin bestehen, die Funktion "Analyse before Measure" zu aktivieren, eine größere Bandbreite und ein geringeres Duty Cycle zu verwenden und die Sendeleistung zu reduzieren. Im Falle von Autobahnszenarien kann die Kompassmethode mit dem üblichen Duty Cycle, der Bandbreite und der Sendeleistung aktiviert werden. Das bedeutet, dass jedes Radar-Unternehmen individuell festlegen wird, wie es unter bestimmten Interferenzbedingungen reagieren wird. Allerdings kann die Stärke der Kooperation noch weiter erhöht werden, wenn für bestimmte Szenarien eine gezielte Reaktion erforderlich ist und gleichzeitig die Flexibilität bei der Nutzung der HF-Ressourcen maximiert werden soll.

5.6.1 Einschätzung Aufwand

Der Implementierungsaufwand erscheint als noch höher als bei dem Analyse-before-Measure Verfahren, weil zusätzlicher Rechenaufwand für die Analyse der Fahrscenarien erforderlich ist. Die von verschiedenen Radarsensoren verwendeten Wellenformen sollten sich nicht gegenseitig stören, was einen Koordinationsaufwand zwischen allen Beteiligten erfordert. Eine künftige Aufgabe wird die Definition der Randbedingungen für kommende Modulationsverfahren bei bestimmten Fahrscenarien sein. Die flächendeckende Verfügbarkeit hinreichend breitbandiger Kommunikationskanäle für diese Aufgabe stellt eine weitere Herausforderung dar.

5.7 Heuristisches Ausweichverfahren basierend auf CPM

Collective Perception Message (CPM) ist ein neuer Nachrichtentyp, der in dem V2X Kommunikationsstandard [CPM] aktuell spezifiziert wird. Verschiedene Applikationen wie z.B. Overtaking Warning, Extended Intersection Collision Warning, Cooperative Adaptive Cruise Control, Long-term Road Works Warning und Special Vehicle Prioritisation sollen hiermit unterstützt werden. Der

Hauptzweck von CPMs ist der Austausch von Informationen zwischen Netzknoten über Objekte in der Umgebung, die von Sensoren, Kameras oder anderen Informationsquellen, die am sendenden Verkehrsteilnehmer angebracht sind, erfasst wurden.

Zusätzlich werden Detailinformationen zu den einzelnen Sensoren übermittelt. Im Falle von Radarsensoren können relevante Parameter verteilt werden, die zur Beurteilung einer möglichen Interferenzsituation herangezogen werden können. In einem Interferenzszenario zwischen 24-GHz- und 77-GHz-Radarsensoren würden beispielsweise keine Maßnahmen ergriffen, wenn Informationen über das Frequenzband der Radarsensoren ausgetauscht würden. Jedoch ist der Umfang der Parameter-Information auf 2 Bytes limitiert. Damit ist auch die Wirksamkeit begrenzt.

5.7.1 Einschätzung Aufwand / besondere Anforderungen

CPM Service ist schon im Kommunikationsstandard vorhanden, sie muss aber um die 2 Bytes Information pro Radarsensor ergänzt werden. Zusätzlicher Software Aufwand zur Implementierung des Ausweichverfahrens im Sensor ist notwendig. Die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit ist jedoch absehbar und würde auch mit dem Einsatz der oben genannten Anwendungen gegeben sein.

5.8 Anforderungen an die Kommunikation

In der folgenden Tabelle sind die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit eines Kommunikationssystems aus der Sicht der starken Kooperation dargestellt [IMIKO-AP3].

Parameters	IMIKO Requirements
Transmission Rate	$\geq 10\text{Hz}$, better 20Hz
Transmission Dynamics	Static, low, high
Message Size	Less than 200 bytes
Message Latency	(100ms as CAM) better 50ms
Transmission Mode	Multicast/ Unicast
Transmission Type	Repetitive
Area of Relevance	urban/suburban 150m, highway 500m
Security Requirements	IEEE 1609.2
Functional Safety Requirements	Dependent on the ASIL Level of the Application

6 Übersichtstabelle zur Bewertung der kooperativen Minderungsmaßnahmen

Im Folgenden wird eine Einschätzung der betrachteten Methoden nach Aufwand und Nutzen (siehe auch Abschnitt 3.2) in Form einer Übersichts-Tabelle dargestellt. Die Zahlenwerte sind die Mittelwerte aus den Einschätzungen, die von den Sensorherstellern individuell abgegeben wurden.

Nutzen = Durchschnittliche I/N-Verbesserung

Referenz = I/N von nicht-kooperativer (Hersteller-individueller) Zufalls-Methode.

	Kooperation	Methode	Implementierungsaufwand (0=gering ... 5=hoch)	Nutzen (I/N-Verbesserung) (0 gering ... 5 hoch)
Stand der Technik	Keine	Hersteller-individuelle Zufallsmethode	0,2	0,2
	Keine	Detect and Repair ^{*)}	2,2	3,0 für den Fall wenig Störer
IMIKO-Vermeidungsverfahren	Schwach	Hersteller-gemeinsame Zufallsmethode	1,8	1,4
	Schwach	Kompass	2,7	3,2
	Schwach	Analyse before Measure	3,7	2,7
	Schwach	Random Timing	1,7	1,7
	Schwach	Sofortige Chirp Unterbrechung	3,7	1,3
	Mittelstark	Heuristisches Ausweichverfahren basierend auf CPM	3,7	2,7
	Mittelstark	Kognitives Radar mit Kommunikationsfähigkeit	4,7	3,0
	Mittelstark	Radar Netzwerk mit zentralem Server	4,5	3,2
	Stark	Modified Radar Mac / zentrale Steuerung	4,5	3,5

^{*)} Detect&Repair stellt eine jeweils Hersteller-proprietäre Signalverarbeitungsmaßnahme im Empfangspfad dar und ist kein Vermeidungsverfahren. Es kann nur eine begrenzte Anzahl von Abtastwerten repariert werden, d.h. für Szenarien mit vielen Störern versagt das Verfahren. Solange es funktioniert ist der Nutzen jedoch hoch.

7 Bewertung der Interferenzmesstechnik

Im Folgenden, wird auf die im Projekt betrachteten messtechnischen Aspekte eingegangen.

7.1 Lessons learned Verifikation / Ringversuch (AP7)

Der Ringversuch hat viele wertvolle Erkenntnisse für die Sensorhersteller geliefert. Der Umfang des Versuchs mit relativ vielen verschiedenen Sensoren und Testfahrzeugen und auch verschiedenen Szenarien ermöglichte ein viel besseres Verständnis der Interferenz und auch des Verhaltens des eigenen Sensors.

Der Ringversuch bestand aus zwei Teilen:

- eine Messreihe im Labor
- eine Testgelände-Messkampagne.

Der Labortest hat den Vorteil, dass man den Versuchsaufbau und Parameter sehr gut kontrollieren kann. Die Messung ist auch gut reproduzierbar, somit kann die Messung mehrmals mit unterschiedlichen Einstellungen wiederholt werden. In IMIKO-Radar sind mehrere Szenarien für die Labormessung ausgewählt worden. Jede Messung ist ohne Störer, mit Störer und, falls es mit dem getesteten Sensor möglich war, mit unkooperativen Minderungsmaßnahmen und aktiven Störer gemessen worden. Die Stör-Sensoren wurden von Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Jeder Testsensor dann gegen alle Störsensoren im gleichen Frequenzband getestet. Die anonymisierten Ergebnisse wurden in Form von Histogrammen dargestellt.

Der zweite Teil des Ringversuchs war eine Testgelände Messkampagne. Eine Messung auf einem Messplatz ist viel näher zu realen Straßenszenarien als eine Labormessung. Die Messung wird nicht nur mit einem Sensor, sondern mit einem Testfahrzeug, das mit Radarsensoren ausgestattet ist, durchgeführt. Es ist möglich, dynamische Szenarien mit mehreren Störsensoren zu messen. Es gibt aber auch Nachteile. Zu diesen zählen deutlich reduzierte Reproduzierbarkeit im Vergleich zu Labortests und ein erhöhter Aufwand. Eine Referenzmessung, so wie im Labortest, ist hier nicht möglich. Es ist auch nicht möglich, das Szenario mehrmals exakt nur mit bewusst unterschiedlichen Parametern zu wiederholen. Die Labortests haben den Einfluss zwischen einem Test Sensor und einem Störer untersucht. Bei der Testgelände Messkampagne wurde sich daher mehr auf Szenarien mit mehreren verschiedenen Störern, wie zum Beispiel eine Kreuzung oder Stau, konzentriert. Die anonymisierten Ergebnisse wurden auch hier als Histogramme dargestellt.

Die Ergebnisse [EUMW2020], [IRS2020], [IRS2021] zeigen, dass die unkooperativen Interferenzminderungsmaßnahmen eine klare Verbesserung in allen ausgewerteten Kriterien ergeben: Mittlere und maximale Rauscherhöhung, False Negative Rate und False Positive Rate sind deutlich verbessert. Dennoch, eine gewisse Degradierung der Performance des gestörten Radars ist vorhanden. Diese Degradierung kann mit mehr gezielten kooperativem Minderungsmaßnahmen noch weiter reduziert werden.

Zusammengefasst kann zur Messkampagne auf dem Testgelände festgehalten werden:

- + Nutzung vieler verschiedener Störer
- + Betrachtung der Interferenz in realen Situationen über der Zeit
- + Test der Auswirkung auf die Applikation

- + Vielfältige Situationen mit hoher Realitätsnähe und insbesondere mehreren Störern
- Reproduzierbarkeit der Messungen ist sehr schwierig, hohe Variation der Messparameter
- Hoher Aufwand, da auch entsprechend viele Messfahrzeuge/Störer verwendet werden müssen
- Referenzmessungen sind nicht möglich

In solch einem Setup ist es allerdings nicht gesichert möglich, einen „worst case“ bzw. „bad case“ aufzubauen, da eine hohe Variation der Messparameter möglich ist.

7.2 Bewertung Mess-Methoden aus AP4

Im Folgenden werden die in AP4 entwickelten Messmethoden eingeordnet.

7.2.1 Verwendbarkeit für ein standardisiertes Messverfahren

In AP1 wurden verschiedene Cluster von Verkehr-Szenarien hinsichtlich ihrer zeitlichen Dynamik und der potenziellen Interferenzleistungsdichte charakterisiert. Bei dem in AP4 realisierten Messaufbau wurden dabei 6 Corner-Szenarien emuliert, um mit vertretbarem Aufwand möglichst viele Interferenz-Situationen abzudecken.

Dies sind im Einzelnen:

- Entgegenkommer, suburbaner Verkehr
- Stauende
- Stockender Verkehr
- Parksituation
- Parallel-Verkehr auf der Autobahn
- Entgegenkommer, suburbaner Verkehr, kleines Radarziel

Bei den Tests wurden vier verschiedenen Ausweichverfahren zur schwachen Kooperation und ein proprietäres Ausweichverfahren zur starken Kooperation berücksichtigt. Ferner kamen bis zu 7 unterschiedliche Störertypen zum Einsatz.

Ausgewertet wurden die Kennzahlen:

- Mittlere Rauscherhöhung
- Maximale Rauscherhöhung
- False Positive (Anteil der Messungen mit Falschzielen)
- False Negative (Anteil der Messungen mit Zielverlust)

Bei der Durchführung der Tests stellte sich heraus, dass allein für die Durchführung der Tests (ohne Auswertung) ein Arbeitsaufwand von mindestens 8 Stunden nötig ist.

Für ein standardisiertes Messverfahren ist dieser Umfang zu aufwendig.

Für eine Bewertung hinsichtlich der Auswirkung auf höhere Schichten der Signalverarbeitung sollte bei zukünftigen Auswertungen auch die mittlere/maximale Zeitdauer eines Zielverlustes und die mittlere/maximale Zeitdauer eines False Positives betrachtet werden.

7.2.2 Eignung für standardisierte Tests

Aus Sicht des Messtechnik-Herstellers sollte man sich für die Standardisierung auf ein Szenario mit einem Störer-Typ und einer Entfernung beschränken. Dabei sollte das Ziel bei ca. 80% der nominellen Reichweite des jeweiligen Sensors- oder Sensor-Modus liegen. Dies kann mit modernen Zielgeneratoren mit variabler Entfernungseinstellung einfach erreicht werden.

Als Störer wird ein fast-ramp-FMCW-Radar vorgeschlagen, da dies aktuell der am häufigsten verwendete Radartyp ist.

Das Szenario „Stauende“ wird als ein standardisierter Test vorgeschlagen, ähnlich [IMIKO-AP4]. Dies stellt ein Szenario mit einem vergleichsweise hohem Gefahrenpotenzial dar. Hier ist mit hohen Geschwindigkeiten und relativ geringer Unterstützung durch weitere Sensoren wie z.B. Kamera zu rechnen. Die Entfernung des Ziels sollte an die maximale Reichweite des Prüflings angepasst werden, ebenso die Relativgeschwindigkeit und die Sendeleistung des Störers entsprechend eines Radars in einem Fahrzeug auf der Nebenspur, das mit einer ähnlichen Geschwindigkeit wie das Ego-Fahrzeug unterwegs ist. Die Mittenfrequenz des Störers sollte abhängig vom Frequenzbereich des Prüflings sein. Die Aussendung des Störers sollte zeitlich andauern. Der Störer könnte also ein Heckradar sein oder auch ein Frontradar dessen Signal über ein dem Störer vorausfahrenden starken Streuer in das EGO Fahrzeug reflektiert wird. Für einen Labortest sollte dieses Szenario entsprechend der Methodik in [IMIKO-AP4] entsprechend abstrahiert werden.

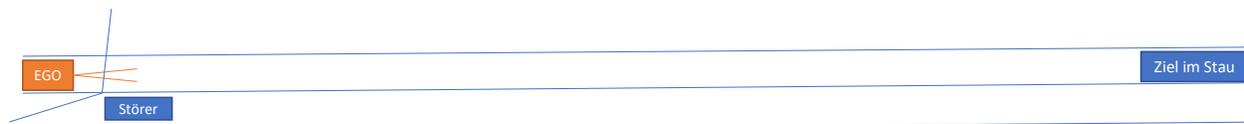


Bild 4 Skizze des empfohlenen Szenarios

7.3 Bewertung aus Sicht der Sensorhersteller

Im Folgenden sind die wesentlichen Stichpunkte aus Sensorherstellersicht festgehalten:

- Eine Möglichkeit zur Beurteilung der Interferenzfestigkeit eines Sensors in definierten Situationen ist wünschenswert.
- Ein Aufbau mit definierten Szenarien wie in AP 4 ist sinnvoll. Diese Szenarien sollten fest definiert über die Testzentren sein.
- Referenzmessungen ohne Störer und hohe Vergleichbarkeit ist gegeben
- Die Nutzung generischer, definierter Störer ermöglicht eine hohe Reproduzierbarkeit
- Ein großer Vorteil ist die Entkopplung des Sensors vom Messablauf. Es muss nur gemäß einem definierten Protokoll ein Radar-Control-Computer (RCC) vom Testrechner gesteuert werden, der auch die Kommunikation mit dem Sensor übernimmt. Dies ermöglicht eine sehr einfache Vorbereitung, insbesondere wenn das Kommunikationsprotokoll standardisiert ist
- Für die Auswertung der Messdaten wäre es ggf. noch wünschenswert, wenn vom RCC auch eine Auswertung der Messdaten gemäß den Szenarioparametern erfolgt. Die Auswertung kann dann sofort mit erfolgen. Beim AP4 wurde diese Auswertung noch von den Demonstratorherstellern einzeln gemacht und anonymisiert überreicht. Hier wäre auch eine Automatisierung über den RCC möglich, so dass die Daten sofort ausgewertet werden können. Dies erfordert aber für jeden Hersteller noch etwas Mehrarbeit.

8 Aktivitäten von internationalen Standard- Organisationen

In AP10 wurden die Aktivitäten verschiedener, internationaler Organisationen für die Regulierung und Standardisierung von Fahrerassistenz-Funktionen und von Frequenznutzung dargestellt [IMIKO-AP10]. Dabei zeigte sich

bezüglich neuer Fahrerassistenz-Funktionen (also betreffend Radar-Sensor-Dichte):

- In Europa müssen kommende Neufahrzeuge serienmäßig mit mehr und mehr Fahrerassistenz-Funktionen ausgerüstet werden, um die Verkehrssicherheit weiter zu erhöhen.
- Die Regulierung und Standardisierung von Funktionen zum mehr automatisierten Fahren sind in den letzten Jahren zügig vorangeschritten.

Bezüglich Frequenz-Regulierung (also betreffend verfügbarer Ressourcen):

- Zusätzliches Frequenzspektrum im Bereich von 77 – 81 GHz ist in immer mehr Ländern verfügbar, aber teilweise noch mit länderspezifischen Unterschieden.
- Zuletzt hat auch China den Frequenzbereich 77 – 79 GHz für Automobil-Radare freigegeben.
- In Europa ist eine Weiterentwicklung der vorhandenen Regulierung für 77-81 GHz in Diskussion. Dabei geht es um eine Erhöhung der erlaubten spektralen Sendeleistungsdichte, um auch Assistenz-Funktionen mit geringer Modulationsbandbreite und hoher Reichweite im Frequenzbereich 77-81 GHz betreiben zu können.

Bezüglich Standardisierung von Interferenz-Tests:

- In Europa ist eine Weiterentwicklung der vorhandenen Standardisierung zur effizienten Nutzung des Frequenz-Spektrums bei ETSI in der Diskussion. Dabei geht es um die noch Hersteller-neutralere Formulierung eines unkooperativen Interferenz-Tests mit PASS/FAIL-Kriterium, was sich aber schwierig gestaltet, da Radar-Sensoren bisher sehr kundenspezifische Entwicklungsanforderungen haben.
- In USA hat IEEE die Entwicklung eines neuen Standards zum Test von Automobil-Radarsensor-Eigenschaften inkl. Test der Interferenz-Robustheit gestartet.
- In China wurde zuletzt ein an den europäischen, unkooperativen Interferenz-Test angelehnter Interferenz-Test in eine neue Regulierung aufgenommen.

Bezüglich Standardisierung von Interferenz-Reduktions-Verfahren:

- Bisher gibt es keine solche Standardisierung für Automobil-Radare.
- Bei der International Standardisation Organisation ISO ist ein Antrag aus China zur Standardisierung kooperativer Interferenz-Reduktionsverfahren bei Automobil-Radaren positiv entschieden worden. Dort werden nun zuerst im Rahmen eines maximal drei Jahre dauernden Preliminary Work-Items (PWI) Grundlagen für einen späteren Standard entwickelt [ISO-WG]. Abhängig vom Ergebnis kann im Anschluss dann im Rahmen eines Work-Items ein Standard entwickelt werden. Die Ergebnisse des Förderprojektes „IMIKO-Radar“ können dort berücksichtigt werden.

- In Europa könnte alternativ eine Standardisierung bei einem ETSI-Technical-Committee in Form eines „Technical Specification“-Dokumentes erstellt werden (siehe. z. B. die Spezifikation des „Detect and Avoid“-Verfahrens in ETSI TS102754 [ETSI_TS]).
- In Europa könnte alternativ eine Standardisierung bei einer ETSI-Industry-Specification-Group auch in Form eines „Group Specification“-Dokumentes erstellt werden (siehe. z. B. die Spezifikation des „System, host and platform managements“ in ETSI GS MEC 010-1 [ETSI_GS]).
- Außerhalb von ETSI kann ein Industrie-Standard auch über die Gründung einer „Special Interest Group“ erstellt werden (siehe. z. B. Special Interest Group für Bluetooth [SIG]).
- Die übliche Dauer für die Entwicklung eines Standards beträgt mehrere Jahre.

9 Empfehlung aus Sicht von IMIKO-Radar

Basierend auf den vorgenannten Ergebnissen und vor dem Hintergrund der steigenden Zahl von automobilen Radarsensoren in Anwendung als auch steigender Anforderungen im Hinblick auf das automatisierte Fahren erscheinen folgende Vorschläge für eine erfolgreiche kooperative Interferenzminderung bei Automobil-Radaren wichtig und empfehlenswert:

Das Thema „spektrale Effizienz“ soll bei der Auslegung von neuen Radaren von Beginn an mitberücksichtigt werden. Ein Automobil-Radar sollte nur so viel Bandbreite und Sendezeit belegen, wie für die Erfüllung der jeweiligen Funktion auch notwendig ist. Aussendungen, die im Empfangspfad nicht für die Messauswertung genutzt werden, sollten auf ein sinnvolles Minimum beschränkt werden, siehe [IMIKO-AP2.3 Abschnitt 2].

Neue digitale Modulationsarten (z.B. PMCW oder OFDM), die eine hohe instantane Bandbreite aufweisen, stellen eine neu-artige Interferenz-Situation für die Bestandsradare im Feld dar, für die diese nicht ausgelegt sind. In Abschnitt 2.1 wurden verschiedene Optionen diskutiert. Jedoch erscheint eine weitere Untersuchung des Sachverhaltes und die Findung von geeigneten Lösungen sehr geboten.

Die Förderung und Unterstützung der Arbeiten für eine welt-weit harmonisierte Frequenz-Regulierung, die eine durchgängige Nutzung des Frequenzbereichs 76-81 GHz für Automobilradare ermöglicht, sind wichtig, damit ein effektives Ausweichen in Frequenzrichtung ermöglicht wird (siehe Abschnitt 2.2).

Die Verwendung eines detect&repair Mechanismus wird unabhängig von weiteren kooperativen Maßnahmen empfohlen, da auch in Zukunft eine Maßnahme zur Interferenzbehandlung von alten oder unkooperativen Radarsensoren, bzw. auch in Fällen einer Ressourcen-Erschöpfung benötigt wird.

Für die Verfahren der schwachen Kooperation (regelbasierte Verfahren) und der starken Kooperation (kommunikationsbasierte Verfahren) wurden eine Reihe vielversprechender Konzepte erstellt, diskutiert und vorausgewählt. Insgesamt erscheinen die Verfahren der schwachen Kooperation weniger aufwändig als die der starken Kooperation. Die Effektivität der Verfahren ist stark abhängig von den verfügbaren Ressourcen. Wenn wenige Sensoren (z.B. 3 und weniger) in der Szene sind hat das Ausweichen in der Zeit (Abschnitt 4.3) auch bei voller Bandbelegung Vorteile, wenn die beteiligten Sensoren über einen Duty Cycle von höchstens 50% verfügen. Für viele Sensoren (z.B. 4 und mehr) ist das Ausweichen in Frequenzrichtung effektiv, wenn die mittlere Sensorbandbreite $\leq \frac{1}{4}$ der verfügbaren Bandbreite ist. Die Kompassmethode (Abschnitt 4.2) ist hierbei etwas effektiver, aber auch aufwändiger als ein pseudozufälliges Springen in der Frequenz (Abschnitt 4.1). Das Verfahren Analyze before Measure

(Abschnitt 4.4) wird im Projekt z.T. unterschiedlich bewertet. Der Aufwand erscheint aus heutiger Sicht sehr viel höher als bei der Kompassmethode. Über eine hohe Wirksamkeit liegen erste Indikationen vor.

Für die Bewertung der Verfahren der schwachen Kooperation wurden Simulationen und Messungen durchgeführt. In beiden Domänen stellt die weitgefächerte Häufigkeitsverteilung der Beobachtungsgrößen wie mittlere und maximale Rauscherhöhung, False Positives und False Negatives und deren Persistenz eine große Herausforderung für den jeweiligen Simulations- bzw. Mess-Aufwand dar. Für die Simulation ist typischerweise die mittlere und maximale Rauscherhöhung das zugänglichere Maß, da sie unabhängig von Szenen-abhängigen Zielen bestimmt werden kann. In den Simulationen ist es einfacher eine größere Anzahl an Radar-Sensoren zu berücksichtigen als in den Messungen. Für zukünftige Simulationen und Messungen wird eine Mindestbeobachtungsdauer von 600 Radarmesszyklen empfohlen. Auf eine hinreichend große Anzahl an Wiederholungen für eine konvergente Statistik inkl. Variationen der Szenenparameter ist zu achten.

Verfahren der starken Kooperation zeigen in Abschätzungen aus einzelnen Messungen und Simulation das Potenzial für eine hohe Wirksamkeit. Dem gegenüber stehen enorm hohe Aufwände bzgl. einer zukünftigen umfassenden Verfügbarkeit hinsichtlich Infrastruktur, Normung und Implementierung. Hier gibt es auch für die Zukunft noch weiteren Forschungsbedarf. Die mittelstarke Kooperation auf der Basis der ergänzten CPM Nachrichten (siehe Abschnitt 5.7), könnte in der Zukunft Zusatzinformationen bereitstellen, die die Interferenzminderung dort erleichtern, wo dieser Service verfügbar ist.

Als ein Testszenario für einen einheitlichen Interferenztest wird die Zufahrt auf ein Stauende vorgeschlagen, mit einem zeitlich andauernden Störer in der Nähe, der z.B. mit ähnlicher Geschwindigkeit wie das Egofahrzeug auf der Nebenspur unterwegs ist. Aus diesem Szenario können nach den in [IMIKO-AP4] dargestellten Verfahren Parameter für die Konfiguration des Tests abgeleitet werden.

Die hier dargestellten Ergebnisse können in der Zukunft für weitere Standardisierung bzw. Verwertung dieser Ergebnisse auf verschiedenen Wegen verwendet werden: Zum einen wäre es denkbar, sinnvolle Mindestanforderungen in einem bindenden Funkstandard z.B. beginnend auf europäischer Ebene bei ETSI zu entwickeln. Es könnte auch eine nicht bindende Standardisierung im Rahmen von ISO oder IEEE angestrebt werden. Des Weiteren können Fahrzeughersteller die hier dargestellten Erkenntnisse für die Ableitung von Anforderungen in ihren Lastenheften verwenden. Für einige der vorgestellten Verfahren (Kompassmethode) wurden im Rahmen des ögP auch Patentanmeldungen eingereicht.

10 Referenzen

- [CAM] ETSI TS 103637-2, Intelligent Transport Systems (ITS), Vehicular Communications, Basic Set of Applications, Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service
- [CEPT_79GHz] https://www.cept.org/Documents/se-24/60460/temp04_draft-ecc-report-on-wi73
- [Chandler75] R. A. Chandler, L. E. Wood, and D. A. Jacobson. Analysis of Problems in the Application Of Radar Sensors to Automotive Collision Prevention. DOT-HS-4-00813, March 1975.
- [CPM] ETSI TR 103562, Intelligent Transport Systems (ITS), Vehicular Communications, Basic Set of Applications, Analysis of the Collective Perception Service (CPS), Release 2, 2019
- [Engels21] F. Engels et. al., Automotive Radar Signal Processing: Research Directions and Practical Challenges, IEEE JSTSP special issue on recent advances in automotive radar signal processing, 2021.
- [EURAD2020] L. L. Tovar Torres, M. Steiner, and C. Waldschmidt, "Channel Influence for the Analysis of Interferences Between Automotive Radars," 2020 17th European Radar Conference (EuRAD), 2021, pp. 266-269, doi: 10.1109/EuRAD48048.2021.00075.
- [ETSI_79GHz] https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103593/01.01.01_60/tr_103593v010101p.pdf
- [ETSI_GS] ETSI GS MEC 010-1 v1.1.1, Mobile Edge Computing (MEC); Mobile Edge Management; Part 1: System, host and platform management, 2017.
- [ETSI_TS] ETSI TS102754 v1.3.1, Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics of Detect And Avoid (DAA) mitigation techniques for SRD equipment using Ultra Wideband (UWB) technology, 2013.
- [EUMW2020] A. Ossowska, R. Körber, Automotive Radar Mutual Interference – snapshots of today's situation, Automotive Forum, EUMW2020, virtual conference, Jan. 2021
- [Hischke95] M. Hischke, "Collision warning radar interference," *Proceedings of the Intelligent Vehicles '95. Symposium*, 1995, pp. 13-18, doi: 10.1109/IVS.1995.528250.
- [IMIKO-AP1.1] ögP IMIKO-Radar Projektdokument, AP1.1 Anforderungsableitung – Katalog der relevanten Fahrszenarien, Feb. 2020.
- [IMIKO-AP1.3] ögP IMIKO-Radar Projektdokument, AP1 Anforderungsableitung – Anforderungen an kooperative Interferenzminderungsverfahren, Feb. 2020.
- [IMIKO-AP2.2] ögP IMIKO-Radar Projektdokument, AP2 Schwache Kooperation – Kognitive und Agile Fähigkeiten des Radar-Sensors, Feb. 2020.

- [IMIKO-AP2.3] ögP IMIKO-Radar Projektdokument, AP2.3 Schwache Kooperation - Methoden und Strategien, Dez. 2021.
- [IMIKO-AP3] ögP IMIKO-Radar Projektdokument, AP3 Lösungen Starke Kooperation – Anforderungen an stark kooperative Interferenzminderungsverfahren, Jan. 2022.
- [IMIKO-AP4] ögP IMIKO-Radar Projektdokument, AP4.1 Messtechnik – Anforderungen an Testsetup und Definition der Testscenarien, Dez. 2021.
- [IMIKO-AP10] ögP IMIKO-Radar Projektdokument, AP10 Abstimmung mit Regulierungs- und Standardisierungsgremien, Jan. 2022.
- [IRS2020] A. Ossowska, L. Sit, S. Manchala, T. Vogler, K. Krupinski, U. Lübbert, IMIKO-Radar Project: Laboratory Interference Measurements of Automotive Radar Sensors, MRW/IRS'2020, Okt. 2020
- [IRS2021] A. Ossowska, L. Sit, S. Manchala, T. Vogler, J. Vanova, J. Hejtmanek, K. Krupinski, U. Lübbert, IMIKO-Radar: Interference Measurements of Today's Automotive Radar Sensors, MRW/IRS'2021, virtual conferene, Juni 2021
- [ISO-WG] ISO/TC 22/SC 32/AHG 2, Guidelines for cooperative interference mitigation of automotive millimeter-wave radar, <https://www.iso.org/committee/5383636.html>
- [Meinel] H. Meinel, "Evolving automotive radar – From the very beginnings into the future", The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)
- [MOSARIM] EU project More Safety for All by Radar Interference Mitigation: Project Final Report, 2012
- [RadarConf20] L. L. T. Torres, F. Roos, and C. Waldschmidt, "Simulator Design for Interference Analysis in Complex Automotive Multi-User Traffic Scenarios," 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266318.
- [RadarMAC] J. Khoury, R. Ramanathan, D. McCloskey, R. Smith and T. Campbell, "RadarMAC: Mitigating Radar Interference in Self-Driving Cars," 2016 13th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON), London, 2016, pp. 1-9
- [SIG] https://de.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_Special_Interest_Group
- [WO21069180] A. Himmelstoß, G. Hakobyan, P. Doll, W. Sörgel, T. Poguntke, S. Engewald, VERFAHREN FÜR EINEN STOERUNGSARMEN BETRIEB MEHRERER RADARSENSOREN, Patentanmeldung, WO21069180 A1.
- [WO2021165262] J. Moss, H.-J. Göz, M. Kritzner, A. Lefevre, M. Fuchs, A RADAR SYSTEM WITH SUB-BANDS, Patentanmeldung, WO2021/165262 A1.
- [WO2021219480] M. Kritzner, J. Moss, A. Lefevre, H.-J. Gölz, M. Fuchs, A RADAR SYSTEM FOR INTERFERENCE AVOIDANCE BASED ON VEHICLE HEADING, Patentanmeldung, WO2021219480

11 Anhang Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Simulationsergebnisse aus ögP IMIKO-Radar dargestellt.

11.1 Ergebnisse Simulationen Universität Ulm

Die Simulationsergebnisse werden von Lizette Lorraine Tovar Torres (Universität Ulm) zusammengefasst.

Im Folgenden sind die allgemeinen Eigenschaften der Simulationen vorgestellt:

- Der Simulator wurde in Matlab implementiert.
- Der Simulator macht die Interpretation des Szenarios, die Erzeugung der Signale und die Signalverarbeitung.
- Ein Katalog mit verschiedenen SRR-, MRR- und LRR-Sensoren in den Frequenzbereichen 76 – 77 GHz und 77 – 81 GHz wurde erstellt.
- Abhängig von der Art des Sensors werden verschiedene Richtcharakteristiken berücksichtigt.
- Der Simulator modelliert die beteiligten Fahrzeuge durch Punktwolken von Streuzentren.
- Verdeckungseffekte von Streuzentren durch andere Objekte werden berücksichtigt.
- Zwei Ausbreitungsmodelle sind verfügbar. Für eine schnelle Simulation wird die direkte Line-of-Sight (LoS) des Signals berücksichtigt. Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung des Zwei-Pfade-Ausbreitungsmodells dar.
- Eine genauere Beschreibung der Simulationsumgebung ist in [RadarConf20] und [EURAD2020] dargestellt.

Die Wirksamkeit der Verfahren zur Interferenzminderung wurde unter Berücksichtigung von zwei Verkehrsszenarien simuliert. Das erste Szenario entspricht einer Autobahn mit sechs Spuren und 105 Fahrzeugen, das zweite Szenario entspricht einer Straßenkreuzung mit vier Spuren und 34 Fahrzeugen. Jedes Fahrzeug ist mit fünf Radarsensoren ausgestattet (vier MRR - MRR/SRR-Sensoren mit genau den gleichen Parametern an den Ecken und einem LRR – LRR/MRR-Front-Radarsensor). Da die Sensoren an den Ecken im gleichen Frequenzband arbeiten und sich möglicherweise im FoV überlappen, ist es notwendig, die Sensoren zu synchronisieren. Auf diese Weise werden die Sensoren innerhalb eines Fahrzeugs mit verschachtelten Rampen zeitlich akkurat synchronisiert.

Die Simulationszeit pro Lauf beträgt 20s, und es wurden mehrere Simulationsdurchgänge durchgeführt. Jeder Simulationslauf wurde unter Aufrechterhaltung derselben Konfiguration des Szenarios durchgeführt, d.h. mit identischen Fahrzeugpositionen und –geschwindigkeiten. Jedoch wurden die Parameter jedes Sensors in jedem Simulationslauf verändert.

Die Simulationszeit pro Lauf wird in Simulationsschritte unterteilt. Die Anzahl der Simulationsschritte ist von der Zykluszeit des gestörten Sensors abhängig, daher variiert die Menge der zu analysierenden Daten von Lauf zu Lauf. Jedes Szenario wird mit und ohne Berücksichtigung der Interferenz simuliert. Die Analyse erfolgt durch den Vergleich der Rauschpegel mit und ohne Berücksichtigung der Interferenz bei jedem Simulationsschritt.

Die Analyse jedes Simulationslaufs wird in einem Histogramm zusammengefasst, in dem der Prozentsatz der Simulationsschritte mit 0 dB, 1 dB, 2 dB, 3 dB, ..., 30 dB Rauscherhöhung ausgerechnet wird.

Schwache Kooperation

Sechs verschiedene Verfahren werden in der Simulation betrachtet:

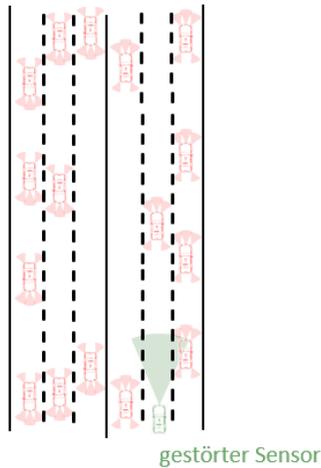
1. Bad-Case-Betrachtung: alle Radarsensoren haben dieselbe Mittenfrequenz.
2. Original-Case-Betrachtung: die beteiligten Sensoren verwenden die ursprünglichen Parameter, die im Katalog festgelegt sind, d.h. unterschiedlichen Mittenfrequenzen.
3. Zufälliger Wechsel der Mittenfrequenz: Der pseudozufällige Wechsel der Mittenfrequenz erfolgt spätestens nach 250ms im Frequenzband 77-81 GHz. Für die Vereinfachung der Simulation wird angenommen, dass ein Wechsel stattfindet, unabhängig davon, ob Interferenz detektiert wird oder nicht.
4. Zufälliger Wechsel der Mittenfrequenz unter Verwendung diskreter Kanäle: Der pseudozufällige Wechsel der Mittenfrequenz erfolgt spätestens nach 250ms unter der Annahme einer Aufteilung des Frequenzbandes 77-81 GHz in vier diskrete Kanäle. Es wird angenommen, dass ein Wechsel stattfindet, unabhängig davon, ob Interferenz detektiert wird oder nicht.
5. Fahrtrichtungsabhängiger Wechsel der Frequenz unter Verwendung diskreter Kanäle (Kompassmethode).
6. Zufälliger Wechsel des Zyklus-Timings.

Bei dem Vergleich des zufälligen Wechsels der Mittenfrequenz mit und ohne Kanäle (Verfahren 3 und 4) wurde es festgestellt, dass der zufällige Wechsel der Mittenfrequenz unter Verwendung diskreter Kanäle bessere Eigenschaften gegen Interferenz aufweist. Daher wird der zufällige Wechsel der Mittenfrequenz ohne Kanäle (Verfahren 3) nicht dargestellt.

Die folgenden Bilder 6-9 zeigen die Auswertung der mittleren Rauscherhöhung für die Original-Case-Betrachtung in rot (No mitigation), den zufälligen Wechsel der Mittenfrequenz unter Verwendung diskreter Kanäle in lila (Frequency Hopping), den zufälligen Wechsel des Zyklus-Timings in blau (Random Timing) und die Kompassmethode in gelb (Compass Method) für die Autobahn und die Straßenkreuzung. In den Darstellungen mit kumulativen Häufigkeiten ist jeweils das Verfahren, das bei den geringsten Störungen (x-Achse) die höchsten Häufigkeiten (y-Achse) liefert das Beste.

Autobahn → schwache Kooperation

- Simulationszeit pro Lauf : $t_{szenario} = 20$ s
- 6 Fahrspuren
- 104 Fahrzeuge mit 5 Radaren + gestörter Sensor
- 520 potenzielle Störer, 209 verschiedene Sensoren



Straßenkreuzung → schwache Kooperation

- Simulationszeit pro Lauf : $t_{szenario} = 20$ s
- 2 vertikale + 2 horizontale Fahrspuren
- 33 Fahrzeuge mit 5 Radaren + gestörter Sensor
- 165 potenzielle Störer, 67 verschiedene Sensoren

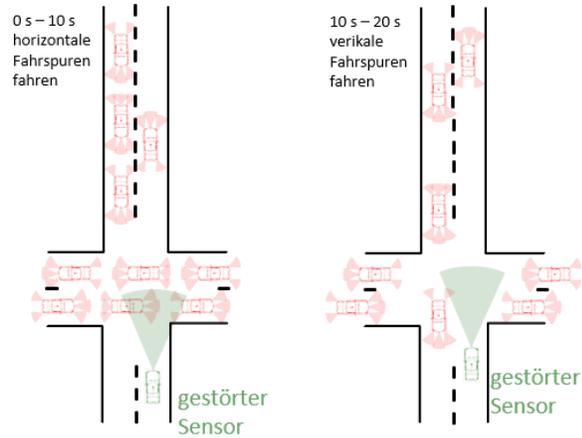


Bild 5 Die Simulation der schwachen Kooperation berücksichtigt die Interferenzeffekte bei einem einzelnen gestörten Sensor. Links: Simulationsaufbau für die Autobahn. Ein Katalog mit 209 verschiedenen Sensoren ist berücksichtigt. Rechts: Simulationsaufbau für die Straßenkreuzung. Ein Katalog mit 67 verschiedenen Sensoren ist berücksichtigt.

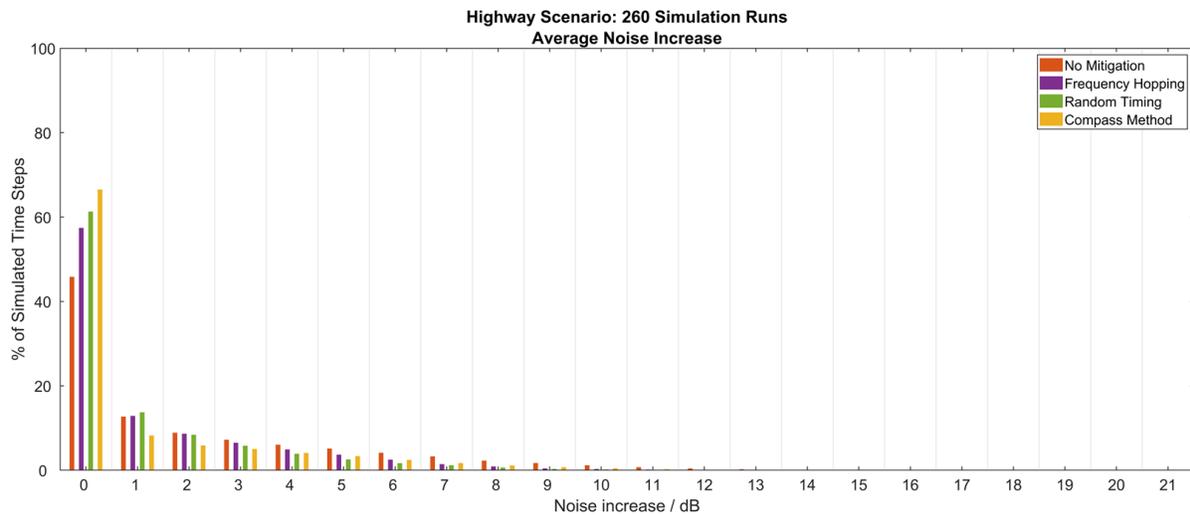


Bild 6: Simulationsergebnisse für das Autobahnscenario unter Berücksichtigung von 260 Simulationsläufen von jeweils 20s. Jeder Durchlauf verwendet eine unterschiedliche Konstellation von Opfer-/Störsensoren aus dem Katalog.

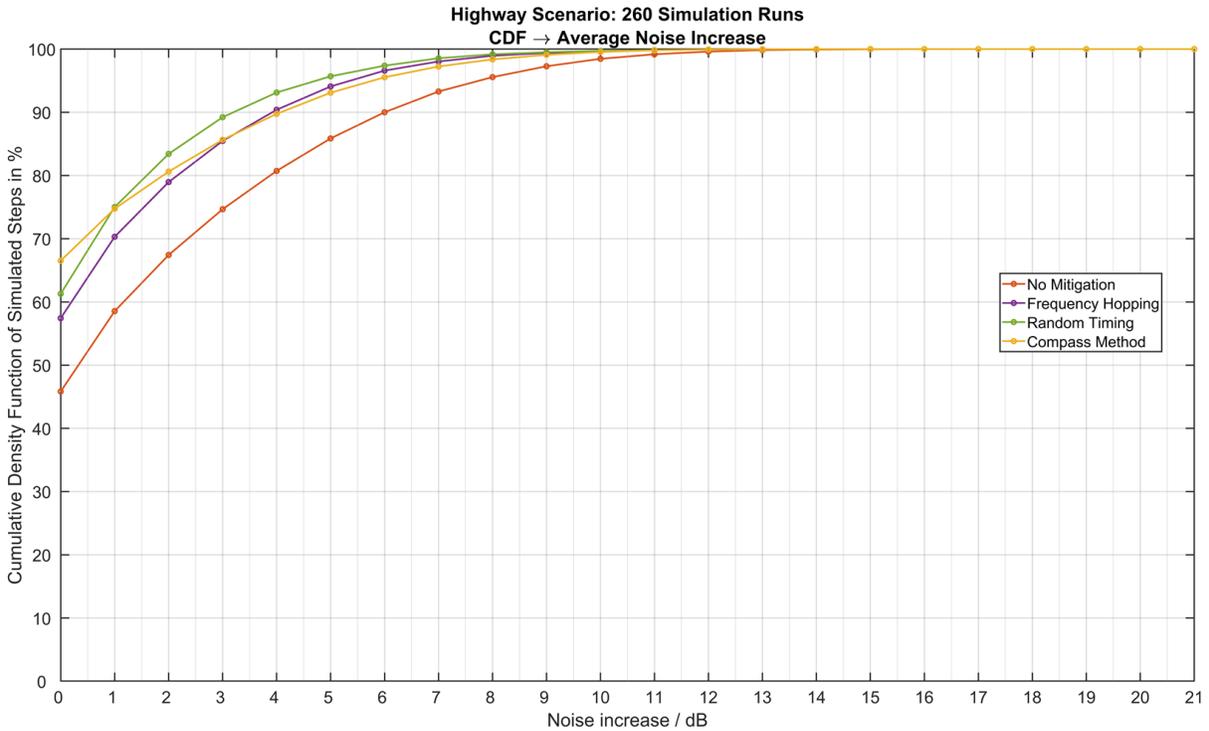


Bild 7 Simulationsergebnisse für das Autobahnszenario unter Berücksichtigung von 260 Simulationsläufen von jeweils 20s. Jeder Durchlauf verwendet eine unterschiedliche Konstellation von Opfer-/Störsensoren aus dem Katalog.

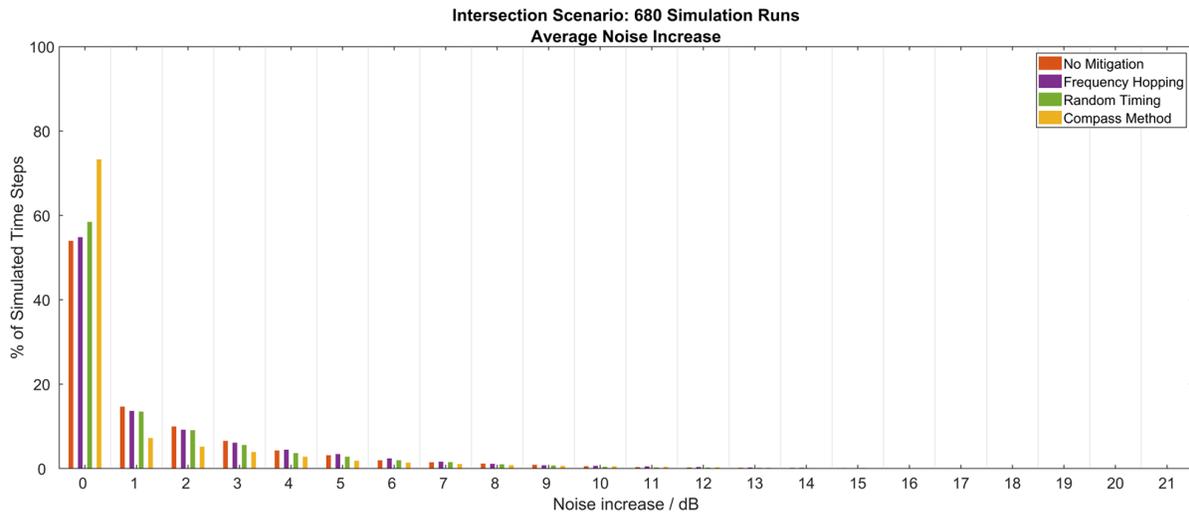


Bild 8 Simulationsergebnisse für die Straßenkreuzung unter Berücksichtigung von 680 Simulationsläufen von jeweils 20s. Jeder Durchlauf verwendet eine unterschiedliche Konstellation von Opfer-/Störsensoren aus dem Katalog.

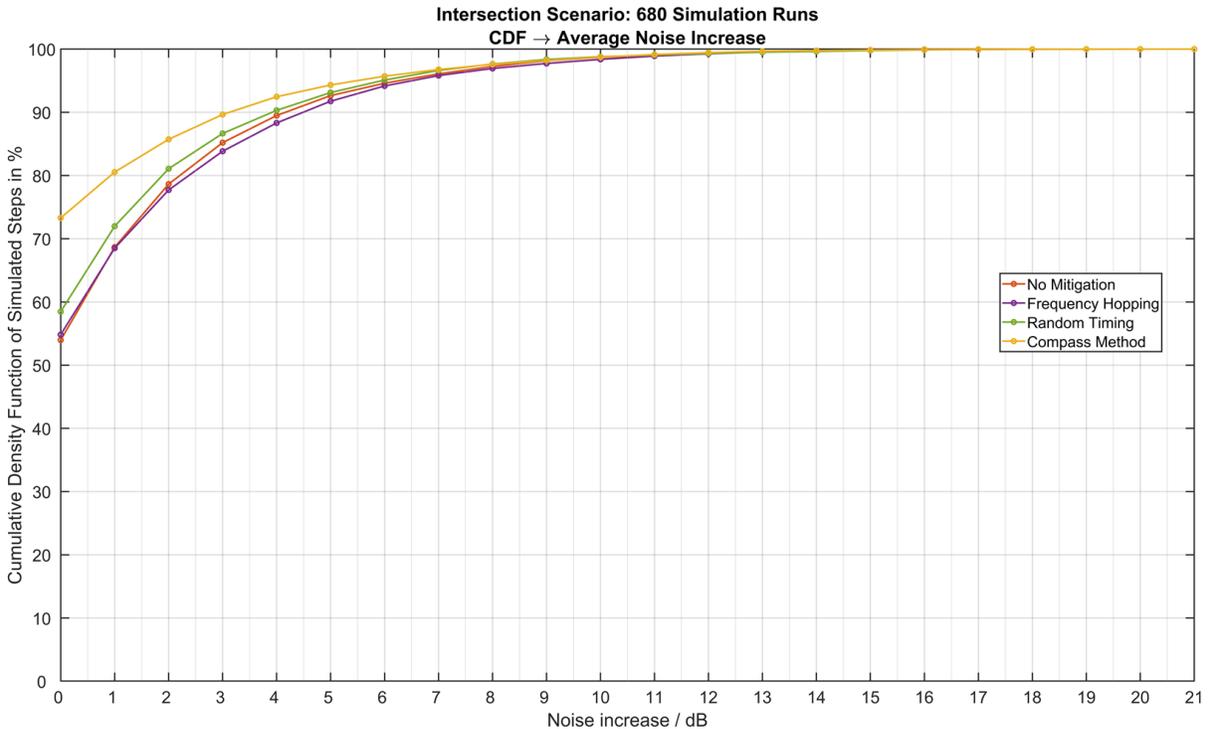


Bild 9 Simulationsergebnisse für die Straßenkreuzung unter Berücksichtigung von 680 Simulationsläufen von jeweils 20s. Jeder Durchlauf verwendet eine unterschiedliche Konstellation von Opfer-/Störsensoren aus dem Katalog.

Der Grund, weshalb die Kompassmethode ihre Überlegenheit gegenüber dem zufälligen Wechsel des Zyklentimings in Bild 7 (Autobahnszenario) nicht unter Beweis stellt, liegt darin, dass LRR gestörte Sensoren (76-77 GHz) in der Bewertung enthalten sind, und die Kompassmethode keine Störunterdrückung von Sensoren in dem Frequenzbereichen 76 – 77GHz garantiert. Da jedes Auto mit einem LRR – LRR/MRR-Front-Radarsensor ausgestattet ist, gibt es eine hohe Interferenzwahrscheinlichkeit, wenn der gestörte Sensor ein LRR ist. Im Autobahnszenario fahren mehrere Autos in die entgegengesetzte Richtung, deshalb ist dieser Effekt hier deutlicher sichtbar.

Die Auswertung der mittleren Rauscherhöhung ohne Berücksichtigung der LRR gestörten Sensoren ist in den Bildern 11 – 14 gezeigt. Es fällt auf, dass die Kompassmethode das wirksamste Verfahren ist.

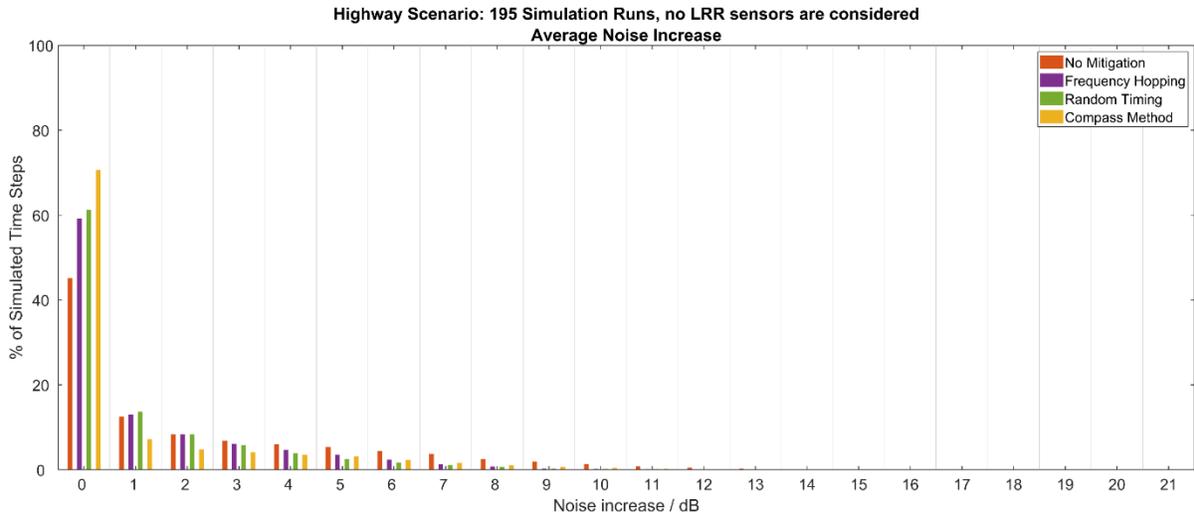


Bild 10 Simulationsergebnisse für das Autobahnscenario unter Berücksichtigung von 195 Simulationsläufen mit jeweils 20s Dauer. Jeder Durchlauf verwendet eine unterschiedliche Konstellation von Opfer-/Störsensoren aus dem Katalog. LRR gestörte Sensoren werden nicht betrachtet.

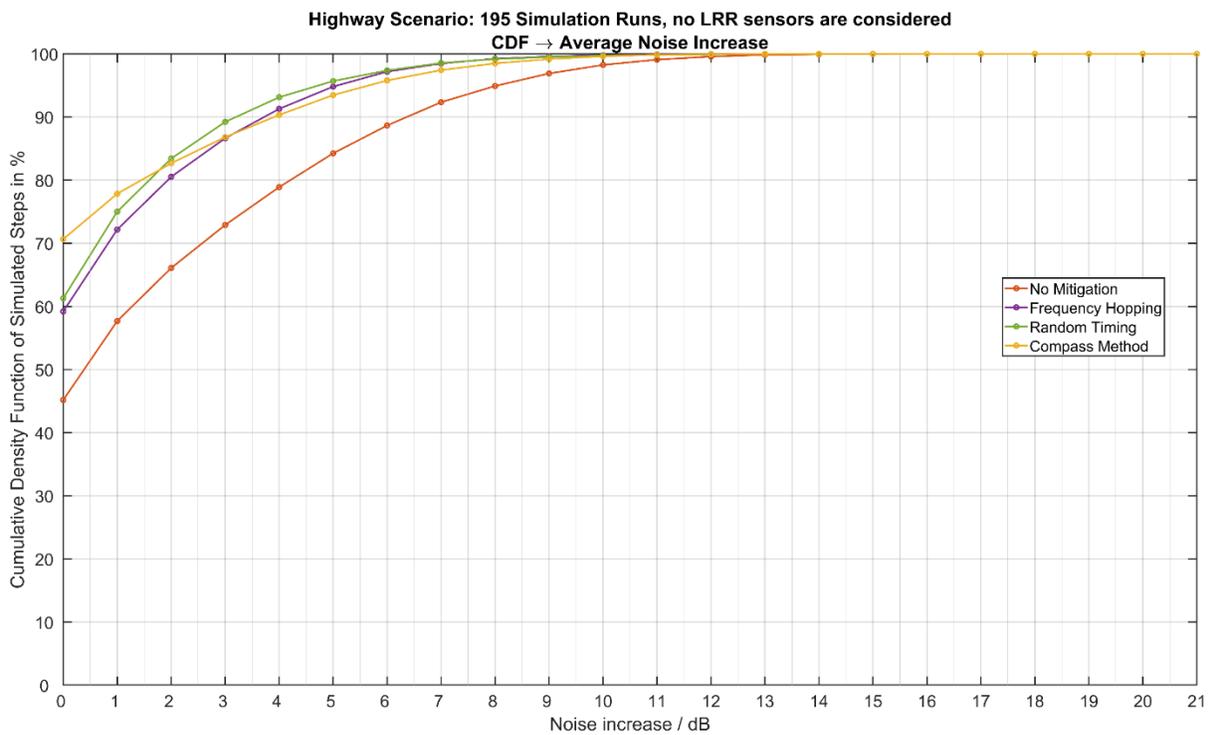


Bild 11 Simulationsergebnisse für das Autobahnscenario unter Berücksichtigung von 195 Simulationsläufen mit jeweils 20s Dauer. Jeder Durchlauf verwendet eine unterschiedliche Konstellation von Opfer-/Störsensoren aus dem Katalog. LRR gestörte Sensoren werden nicht betrachtet.

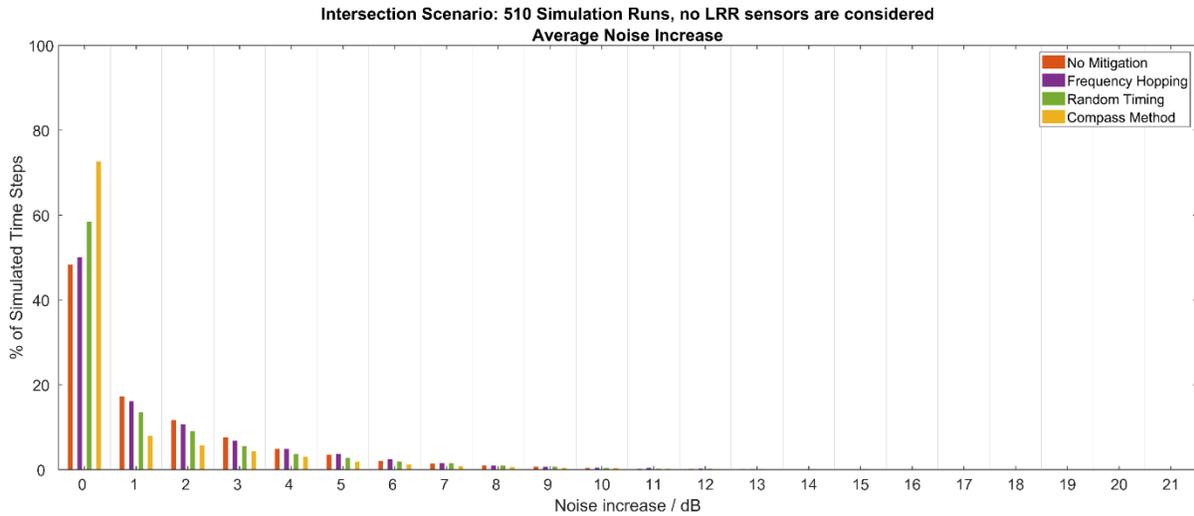


Bild 12 Simulationsergebnisse für die Straßenkreuzung unter Berücksichtigung von 510 Simulationsläufen mit jeweils 20s Dauer. Jeder Durchlauf verwendet eine unterschiedliche Konstellation von Opfer-/Störsensoren aus dem Katalog. LRR gestörte Sensoren sind werden nicht betrachtet.

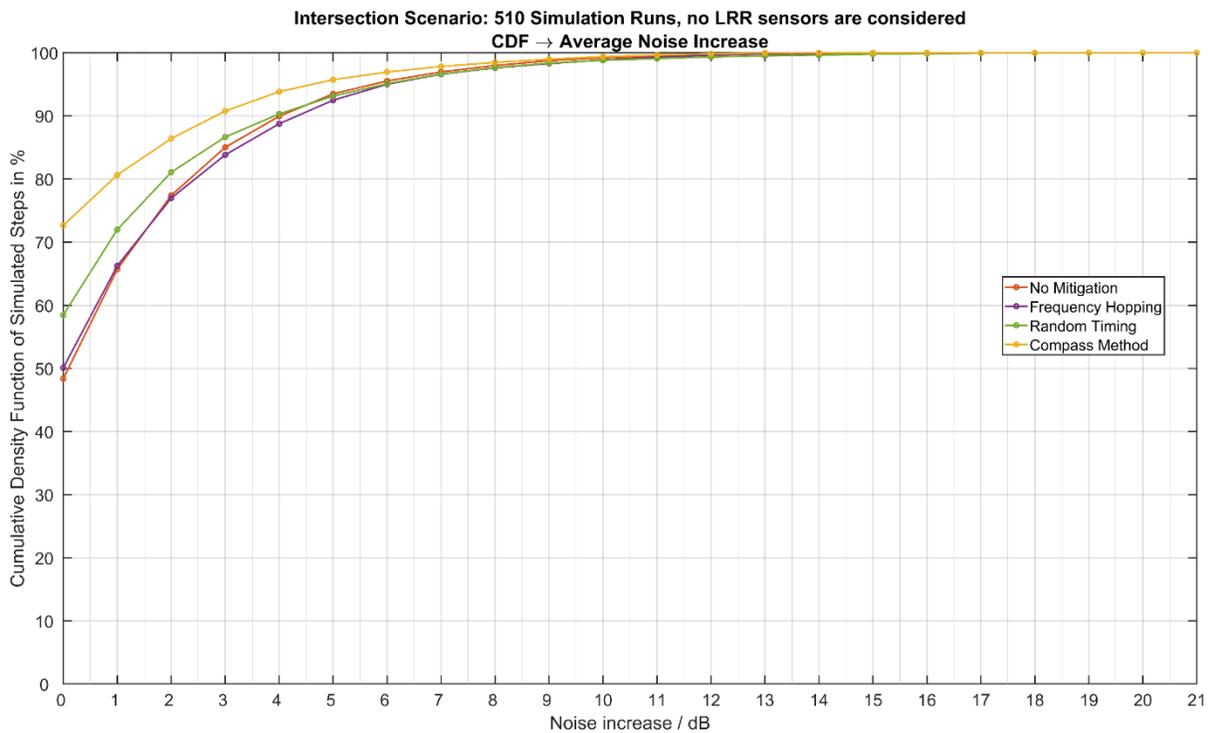


Bild 13 Simulationsergebnisse für die Straßenkreuzung unter Berücksichtigung von 510 Simulationsläufen mit jeweils 20s Dauer. Jeder Durchlauf verwendet eine unterschiedliche Konstellation von Opfer-/Störsensoren aus dem Katalog. LRR gestörte Sensoren sind werden nicht betrachtet.

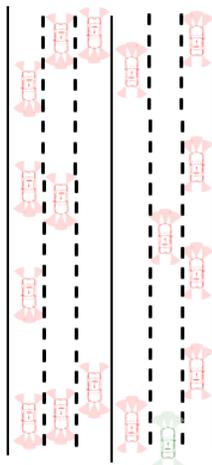
Starke Kooperation

Eine modifizierte Version des RadarMac-Verfahrens [RadarMAC] wird verwendet. Das Verfahren basiert auf einer zentralisierten Netzwerktopologie. Jeder beteiligte Sensor meldet seine relevanten Parameter der Zentraleinheit, welche diese verwaltet und koordiniert. Die Zentraleinheit ist dafür verantwortlich, die Liste der Parameter jedes Störers zu analysieren und zu aktualisieren. Die Analyse erfolgt aus der Etikettierung, Färbung und Planung der zukünftigen Übertragungen.

Die Interferenz wird durch gerichtete Graphen modelliert. Auf diese Weise repräsentieren die beteiligten Sensoren die Knoten des Graphen, während die Interferenzverbindungen die Kanten zwischen den Knoten darstellen.

Autobahn → starke Kooperation

- Simulationszeit pro Lauf: $t_{\text{scenario}} = 20 \text{ s}$
- 105 Fahrzeuge mit 5 Radaren
 - 525 potenzielle Störer/gestörte Sensoren
 - 210 verschiedene Sensoren



Straßenkreuzung → starke Kooperation

- Simulationszeit pro Lauf: $t_{\text{scenario}} = 20 \text{ s}$
- 34 Fahrzeuge mit 5 Radaren
 - 170 potenzielle Störer/gestörte Sensoren
 - 68 verschiedene Sensoren

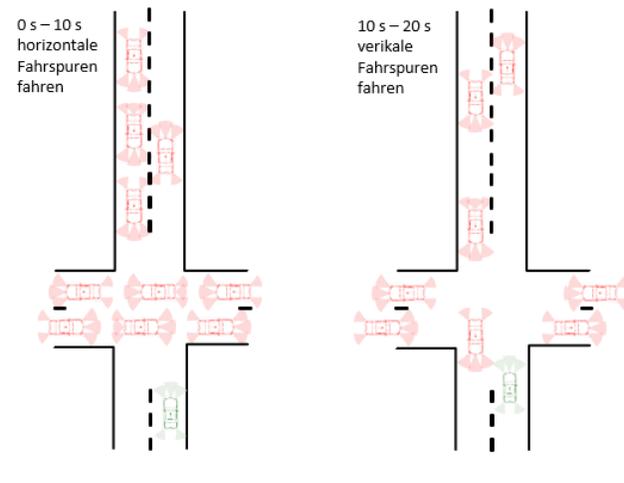


Bild 14 Die Simulation der starken Kooperation werden die Interferenzeffekte über alle die beteiligten Sensoren berücksichtigt. Links: Simulationenaufbau für die Autobahn. Ein Katalog mit 210 verschiedenen Sensoren ist berücksichtigt. Rechts: Simulationenaufbau für die Straßenkreuzung. Ein Katalog mit 68 verschiedenen Sensoren ist berücksichtigt.

Die Simulationszeit pro Lauf wird in Simulationsschritte unterteilt. Für jeden Simulationsschritt wird das Verhältnis der Anzahl der Interferenzlinks aufgrund sichtbarer Sensoren zur maximalen Anzahl an Interferenzlinks berechnet. Die Links, die von dem Fahrzeug verdeckt werden, in dem sich der auszuwertende Sensor befindet, werden nicht betrachtet. Die Analyse wird in einem Histogramm zusammengefasst, in dem für jeden Simulationsschritt der prozentuale Anteil der repräsentativen Interferenzlinks eingetragen wird.

Das Bild 15 zeigt, dass zur Vermeidung von Interferenz in Autobahnsszenarien zwischen 40% - 45% der maximalen Anzahl der Interferenzlinks (100% entspricht 137550 Interferenzlinks) berücksichtigt werden müssen. Das bedeutet, dass Graphen mit 525 Knoten und 55020 - 61897 Kanten betrachten werden müssen. Bei der Straßenkreuzung müssen zwischen 31%-44% der maximalen Anzahl der Interferenzlinks

(100% entspricht 14365 Interferenzlinks) berücksichtigt werden, d.h. Graphen mit 170 Knoten und 4453 - 6320 Kanten.

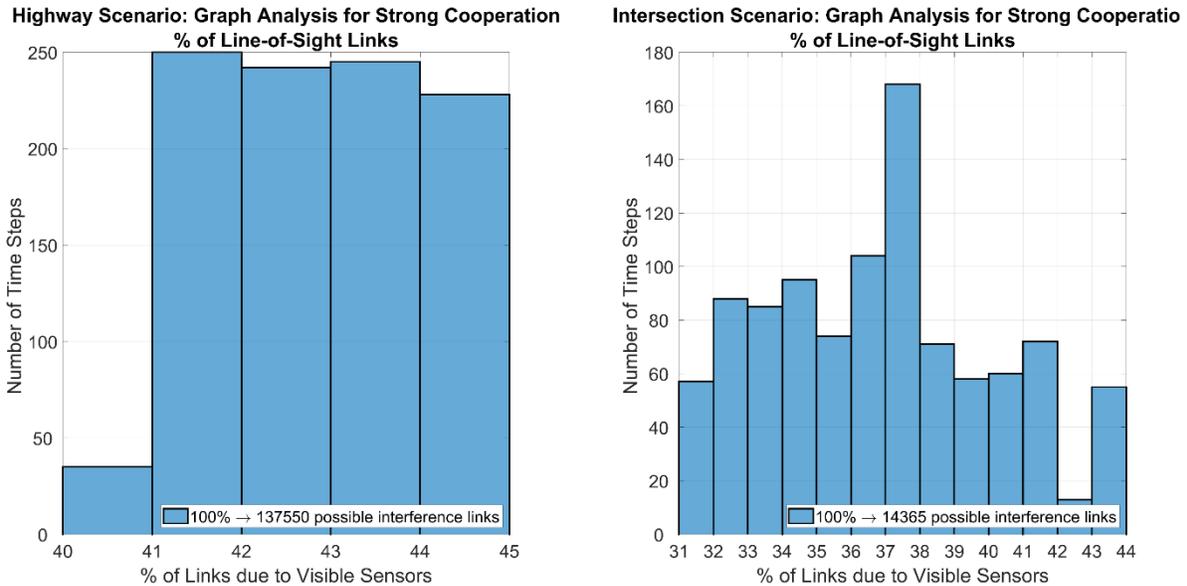


Bild 15 Simulationsergebnisse des Graphen unter Berücksichtigung von 1000 Zeitschritten innerhalb von 20ms. Die Anzahl der Interferenzlinks aufgrund sichtbarer Sensoren wird ohne Berücksichtigung der Links berechnet, die von dem Fahrzeug verdeckt werden, in dem sich der auszuwertende Sensor befindet (Verdeckung innerhalb eines Fahrzeugs). Links: Autobahnszenario mit $\binom{525}{2} = 137550$ maximaler Anzahl von Interferenzlinks. Rechts: Straßenkreuzung mit $\binom{170}{2} = 14365$ maximaler Anzahl von Interferenzlinks.

Die Etikettierung und Färbung des Graphen wird für jeden Simulationsschritt durchgeführt. Der Vorgang erfolgt unter der Annahme, dass zwei verbundene Knoten nicht die gleiche Farbe haben können. Diese Annahme bedeutet, dass zwei Sensoren, die sich gegenseitig stören, unabhängigen Radarparameter (Ressourcen) haben müssen.

Bild 16 veranschaulicht ein Histogramm mit der Anzahl der Farben pro Simulationsschritt. Auffällig ist, dass im Durchschnitt 20 verschiedene Farben (Ressourcen) benötigt werden, um Interferenzen im Autobahnszenario vollständig zu vermeiden. Ebenso Bei der Straßenkreuzung werden im Durchschnitt 9 verschiedene Farben (Ressourcen) benötigt werden, um Interferenzen vollständig zu vermeiden.

Die Implementierung der Planung zukünftiger Übertragungen war aus Aufwandsgründen nicht möglich.

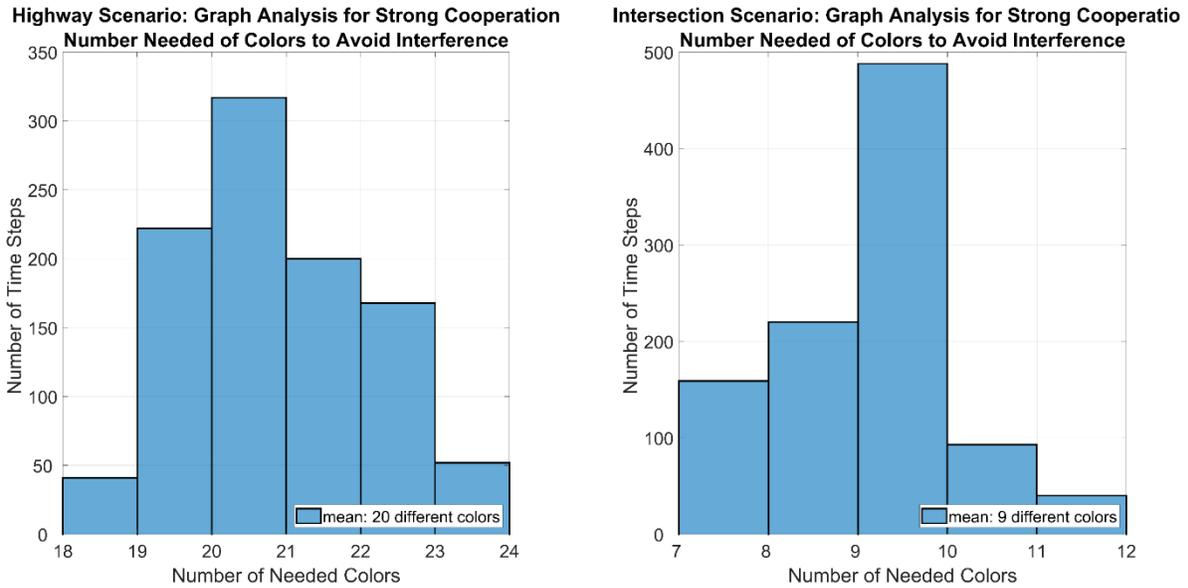


Bild 16 Simulationsergebnisse des Graphen unter Berücksichtigung von 1000 Zeitschritten innerhalb von 20ms. Die Knoteneinfärbung berücksichtigt weder die Schwellenwerte noch die Interferenzstärke der Interferenzlinks. Links: Für das Autobahnscenario werden im Durchschnitt 20 verschiedene Farben (Ressourcen) benötigt, um Interferenzen vollständig zu vermeiden. Rechts: Für das Kreuzungsszenario werden im Durchschnitt 9 verschiedene Farben (Ressourcen) benötigt, um Interferenzen vollständig zu vermeiden.

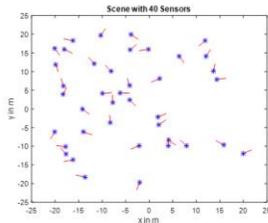
11.2 Simulations-Ergebnisse Vereinfachte Simulation

In Bild 17 werden Simulationsergebnisse für ein abstraktes Szenario gezeigt, in dem 40 Sensoren auf gleichverteilt zufällig auf eine Fläche von 20 x 20 m² verteilt werden. Die Sensoren haben dabei eine gleichverteilt zufällige Orientierung. Ihre Modulation wird zufällig aus einem Modulationskatalog ausgewählt. Jeder Sensor wirkt zusätzlich noch als isotroper Streuer. Das Antennendiagramm der Sensoren wurde einheitlich entsprechend der Darstellung in Bild 17 oben Mitte gewählt. Auf der rechten Seite ist die kumulative Häufigkeit für die Interferenzleistung an einem beliebigen Victim aufgetragen, hierfür wurde die Szene 10-mal gewürfelt und die zufällige Modulationsverteilung für jede Szene 8-mal zufällig erzeugt.

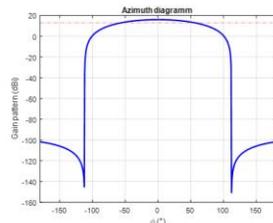
In Bild 18 wird eine Abschätzung der Wirksamkeit von ideal starker Kooperation gezeigt. Hierbei wird die verfügbare Interferenzleistung für eine optimierte Frequenzverteilung mit der Kompassmethode jew. normiert auf den „Bad Case“ verglichen. Beim „Bad Case“ haben alle Radare dieselbe Mittenfrequenz.

pfp IMIKO-Radar Vereinfachte Simulation

► Vereinfachte Simulation (Bosch)

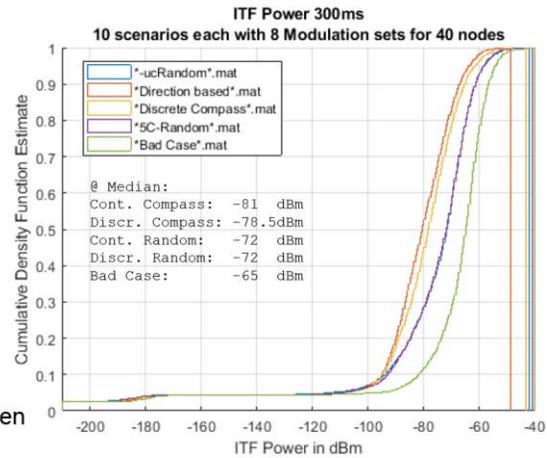


Beispiel zufällige Szene
 $d_{min} = 1,25m$



Ant.diagramm in Azimut

- Knoten wirken gleichzeitig auch als Streuer
- Katalog der Modulationen: 162 chirp sequence Modulationen
 BW/BW_{Band} : 0.2 (56%), 0.4 (22%), 0.5 (22%)



Kontinuierliche Kompassmethode etwas besser als diskrete Kompassmethode. Continuous Random und discrete Random zeigen ähnliche Charakteristik. Kompass besser als Random.

Bild 17 Simulations - Ergebnisse vereinfachte Simulation der Interferenzleistung. Die Simulation beinhaltet das zeitliche Verhalten der einzelnen Radar-Signale.

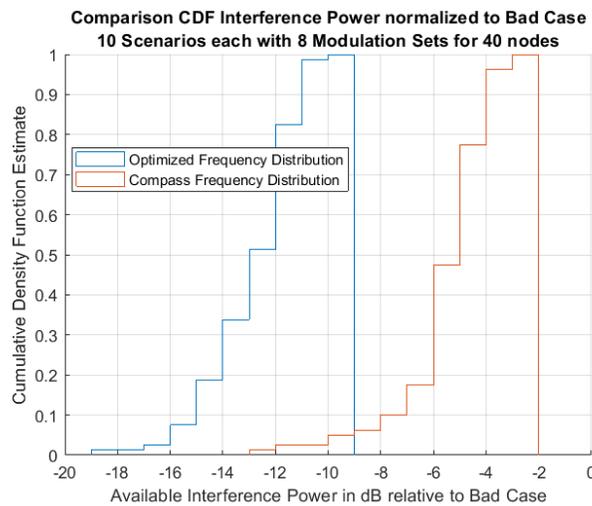


Bild 18 Vereinfachte Simulation: Vergleich verfügbare Interferenzleistung normiert auf den Bad Case (gleiche Frequenz für alle) für Kompassmethode und optimierte Frequenzverteilung im Sinne starke Kooperation. Optimierte Frequenzverteilung (ideale starke Kooperation) ist im Median ca. 7dB besser als Kompassmethode. Für die verfügbare Interferenzleistung wird nur der nominelle Frequenz-Überlapp und nicht die tatsächliche zeitliche Kollision von Signalen berücksichtigt.

12 Anhang Messergebnisse aus AP4

Im Folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse des AP4 Messtechnik hinsichtlich des Vergleichs der verschiedenen Interferenzminderungsmethoden dargestellt.

Eine beispielhafte Umsetzung des Szenarios Stauende (ohne Nachbarspur-Störer) mit Leitplanke ist im Folgenden wiedergegeben:

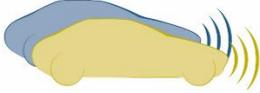
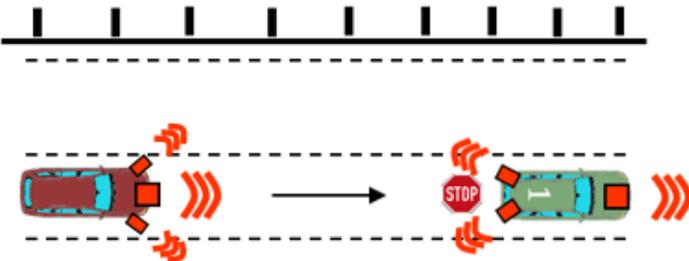
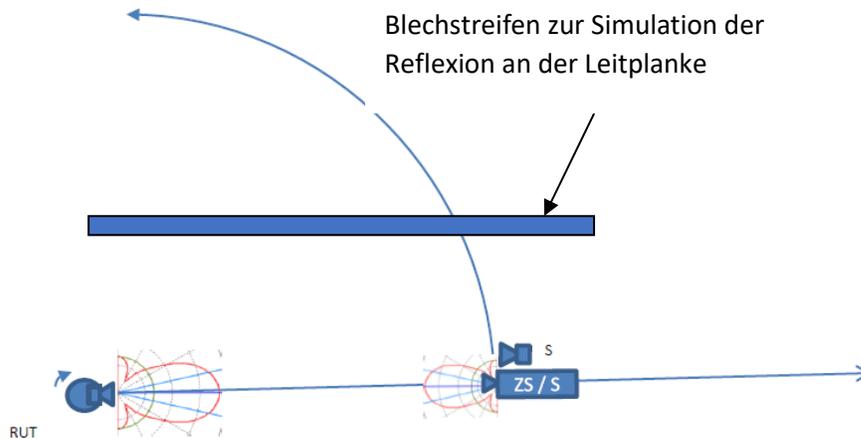
 <p>IMIKO - Radar</p>	<p>Titel</p>	<p>Autobahn – Auffahrt Stauende</p>	<p>AB-S1</p>
<p>Abbildung/Skizze</p> 			
<p>Beschreibung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Auffahrt auf ein stehendes Objekt, welches einen Fahrstreifen blockiert. - Fahrzeug 1 stellt ein Stauende dar. - Stop des Egofahrzeugs hinter dem Objekte 1. 			
<p>Quantitative Parameter (Szenen-spezifisch):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Egofahrzeug 60 Km/h Anfangsgeschwindigkeit, 0 km/h Stoppgeschwindigkeit • Typischer Abstand zwischen den Fahrzeugmitten innerhalb einer Spur: 4-10 m • Spurbreite: 3m, Anzahl der Spuren insgesamt: 2 - 5 • Anzahl Sensoren pro Fahrzeug 0 – 5 - ... (Vollausstattung/Teilausstattung) • Verhältnis Sensoren 77 GHz und 24 GHz: [tbd] 			
<p>Komplexität des Umfelds (zus. Interferenzpotenzial z.B. durch Reflexionen)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gering 			
<p>Auftrittsdauer [s]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurzzeit 	<p>Auftrittshäufigkeit [1/h]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bis zu 8 		
<p>Relevante Grundaktionen (siehe Tab. 1)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrspur folgen, Fahrspur wechseln, Notbrems-Assistent 			

Abbildung idealer Laboraufbau, RUT ist das Frontradar**Beschreibung:**

Es wird 1 Zielsimulator mit je zwei integrierten Störern (2 Seitenradare) verwendet. Der Zielsimulator ist gerade zum Ziel ausgerichtet. Die Drehung der Seitenradare zur Fahrtrichtung wird bei bekanntem Antennendiagramm der Störer über die Amplitude eingestellt. Dasselbe gilt für die Entfernung zwischen RUT und Ziel von 2 bis 7.5 m

Quantitative Parameter (Szenen-spezifisch):

Alle quantitativen Parameter des Testscenarios können berücksichtigt werden.

12.1 Ergebnisse der Messungen zur schwachen Kooperation aus AP4

Im Folgenden sind wesentliche Punkte zur Erstellung der Messungen festgehalten:

- Es wurden unterschiedliche Sensoren mit unterschiedlichen proprietären Signalverarbeitungsketten vermessen. Die Ergebnisse wurden aufgrund der kartellrechtlichen Verpflichtungen von einem unabhängigen Testlabor anonymisiert.
- Der Aufbau beinhaltet typischerweise Szenarien mit ein oder zwei Störern. In einzelnen Szenarien wird ein weiterer fester Störer beigestellt.
- Die Anzahl der Messungen bzgl. der Szenarien und Ausweichmethoden variiert.
- Schmalband Störer: Modulationsbandbreite $\leq 40\%$ der verfügbaren HF-Bandbreite
- Breitband Störer: Modulationsbandbreite $\geq 60\%$ der verfügbaren HF-Bandbreite
- Es wurden jeweils Ergebnisse für False Positive, False Negative, Max. Noise Increase, Average Noise Increase dargestellt.
- Der Aufbau ist in [IMIKO-AP4] dargestellt.
- Bei der Messung wurden nur Messsensoren im 76-77GHz Frequenzbereich genutzt, auch die Mitigationsverfahren wurden auf diesen Bereich zur besseren Vergleichbarkeit eingeschränkt.

- Die Messung „No Mitigation“ setzt kein Verfahren der schwachen Kooperation ein, allerdings ist bei den meisten Sensoren bereits ein passives Mitigationsverfahren aktiv.

12.1.1 Ergebnisse für schmalbandige Störer

20 Messungen (Kompass-Methode: 18, Random Timing: 9)

False Positive / % der maximalen Anzahl der verfügbaren Messungen pro Ausweichverfahren



Bild 19 Auswertung False Positives für schmalbandige Störer (Methoden der schwachen Kooperation)

19 Messungen (Kompass-Methode: 15, Random Timing: 9)

False Negative / % der maximalen Anzahl der verfügbaren Messungen pro Ausweichverfahren

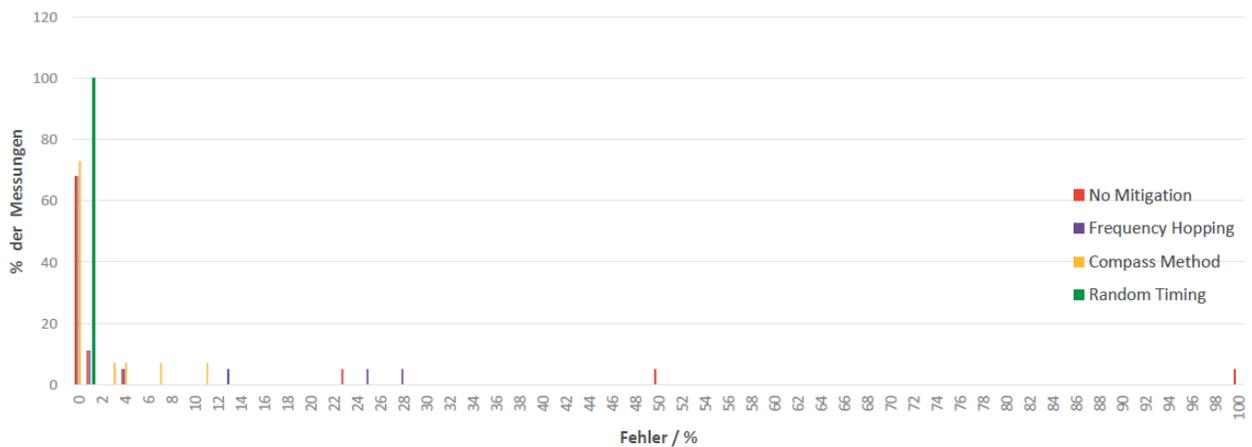


Bild 20 Auswertung False Negatives für schmalbandige Störer (Methoden der schwachen Kooperation)

23 Messungen (Kompass-Methode: 18, Random Timing: 9)

Max. Noise Increase/dB (% der maximalen Anzahl der verfügbaren Messungen pro Ausweichverfahren)

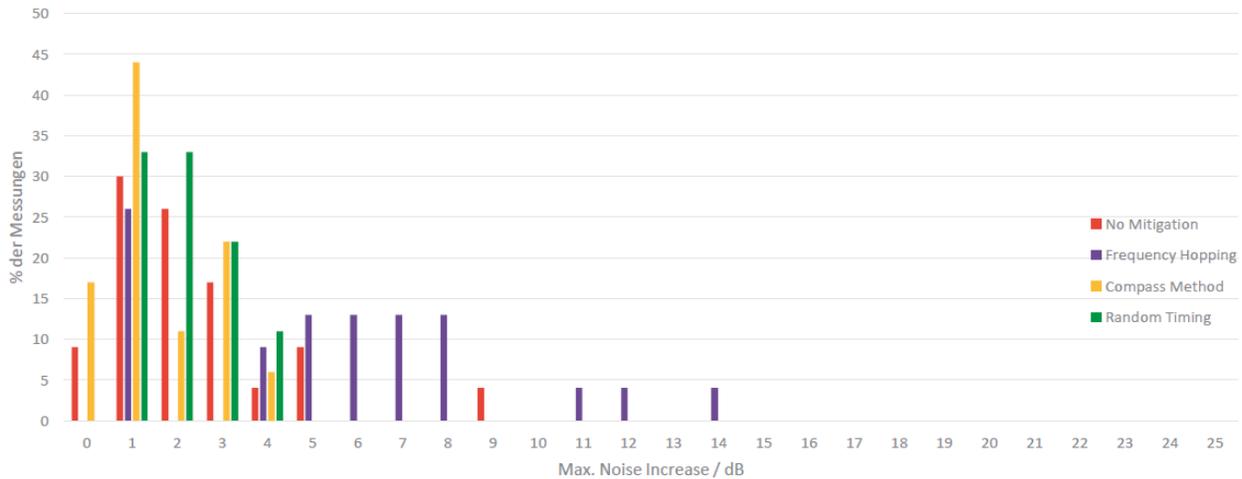


Bild 21 Auswertung max. Rauscherhöhung für schmalbandige Störer (schwache Kooperation)

23 Messungen (Kompass-Methode: 18, Random Timing: 9)

Avg. Noise Increase/dB (% der maximalen Anzahl der verfügbaren Messungen pro Ausweichverfahren)

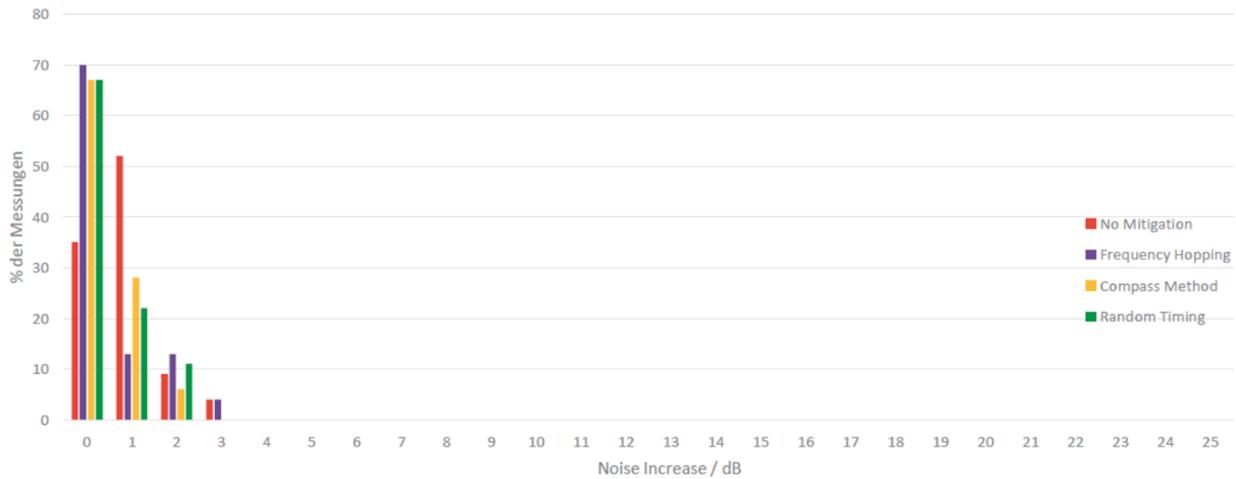


Bild 22 Auswertung mittlere Rauscherhöhung für schmalbandige Störer (schwache Kooperation)

Die Auswertung für schmalbandige Störer ist interpretationsanfällig. Bei den False Negatives ist es relativ klar, dass alle Verfahren gegenüber No Mitigation Vorteile bringen. Betrachtet man allerdings die mittlere Rauscherhöhung, so wird klar, dass die Sensoren insgesamt relativ gut mit der Interferenz zurechtkamen (mittlere Rauscherhöhung max. 3 dB). Daher muss hier die max. Rauscherhöhung

mitbetrachtet werden. Dabei ist klar, dass die Sensoren bei Frequency Hopping z.B. in für sie ungünstigere Frequenzbereiche/Arbeitsbereiche gehen, was das Rauschen auch anhebt. Das ist deutlich für das Frequency Hopping zu sehen, wo die Max. Rauscherhöhung auch darauf zurückzuführen ist, dass hier ein Frequenzband zufällig gewählt wurde, wo die Interferenz maximal war. Dies zeigt auch, dass bei No Mitigation nicht der absolute Bad Case dargestellt ist (Sensornutzfrequenzbereich liegt im Störfrequenzbereich).

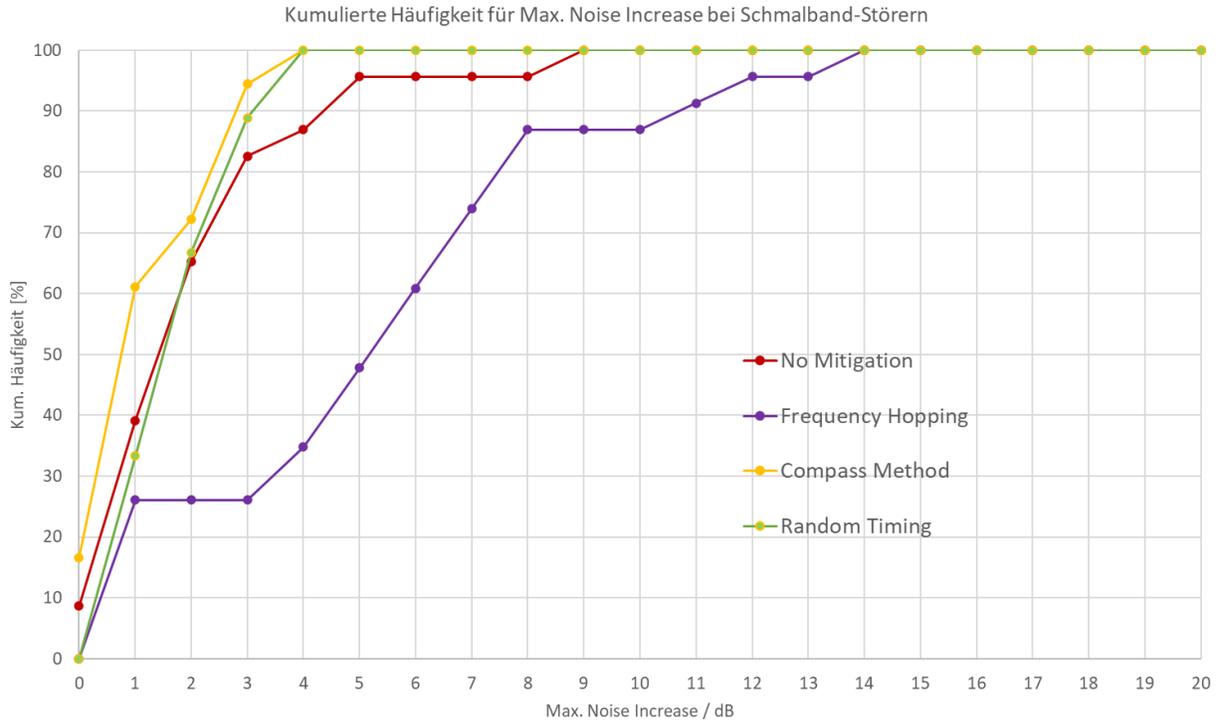


Bild 23: Kumulierte Häufigkeit Max Noise Increase für schmalbandige Störer (schwache Kooperation)

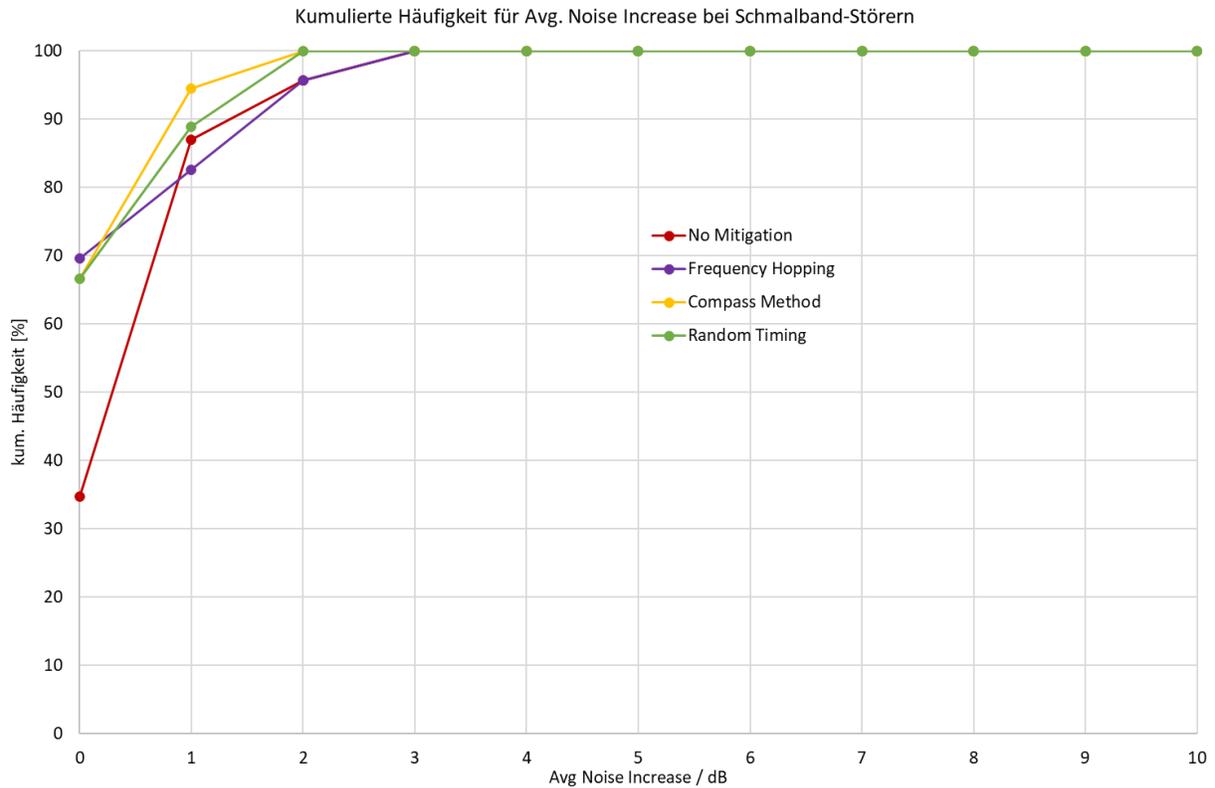


Bild 24: Kumulierte Häufigkeit Avg Noise Increase für schmalbandige Störer (schwache Kooperation)

Betrachtet man die kumulierte Häufigkeit bei dem Messparameter Max Noise Increase erkennt man, dass bis auf Frequency Hopping die Verfahren besser funktionieren als kein Mitigierungsverfahren. Das schlechte Abschneiden bei Frequency Hopping lässt sich relativ einfach damit erklären, dass der Sensor auch mal in den absolut ungünstigen Frequenzbereich mit maximaler Interferenz springt. Hier wäre ein Analyse before Measure ein sinnvolles Verfahren. Dass Frequency Hopping grundsätzlich auch ein sehr sinnvolles Verfahren ist, haben aber auch die Simulationsergebnisse der Uni Ulm in AP6 gezeigt. Nur bei dieser Messung kam aufgrund der gewählten Störer und der Messsensoren dies nicht so zum Tragen.

12.1.2 Ergebnisse für breitbandige Störer

Im Folgenden findet man die Ergebnisse der Messungen in AP4 für die breitbandigen Störer. Hier ist die Erwartungshaltung, dass hier systembedingt das Ausweichen in der Frequenz weniger bringt. Gerade bei der Messung der max. Rauscherhöhung wird Frequency Hopping hier schlechter sein als ohne Ausweichverfahren. Diese Erwartungshaltung bestätigt sich auch in den Diagrammen. Allerdings sollte hier die durchschnittliche Rauscherhöhung (Avg Noise Increase) hier eine Verbesserung zeigen.

69 Messungen (Kompass-Methode: 63, Random Timing: 25)

False Positive / % der maximalen Anzahl der verfügbaren Messungen pro Ausweichverfahren)

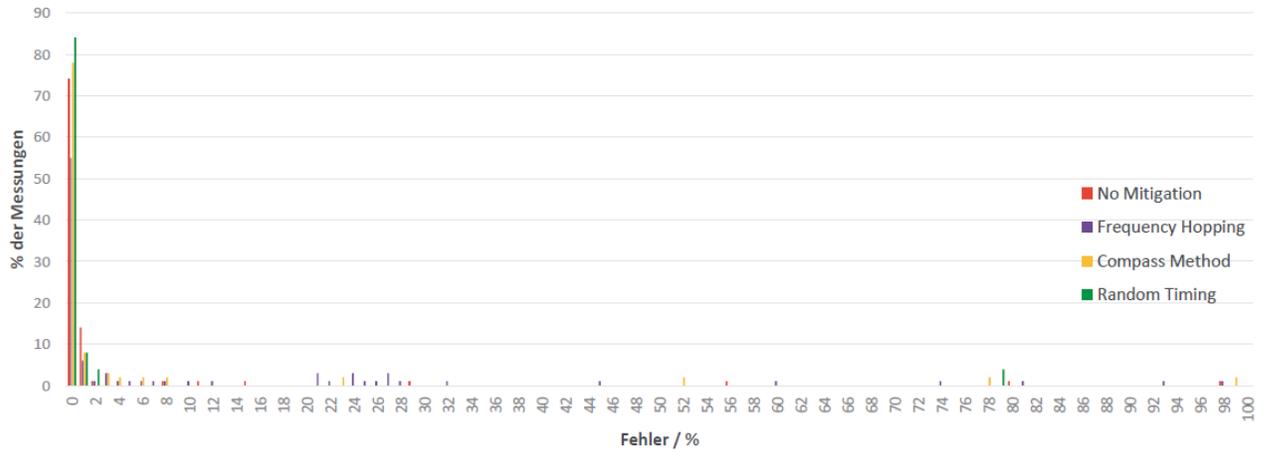


Bild 25 Auswertung False Positives für breitbandige Störer (Methoden der schwachen Kooperation)

61 Messungen (Kompass-Methode: 51, Random Timing: 25)

False Negative / % der maximalen Anzahl der verfügbaren Messungen pro Ausweichverfahren)

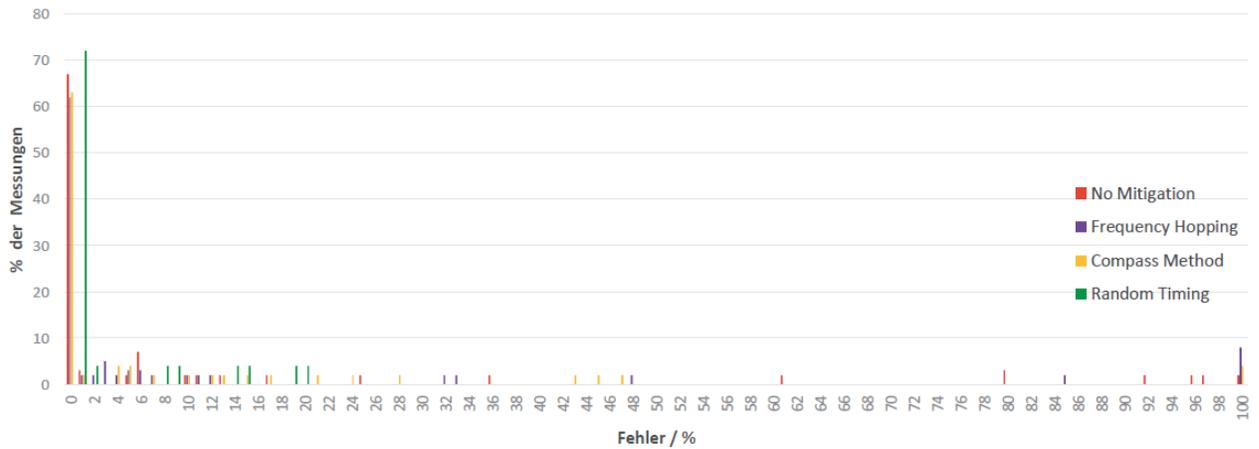


Bild 26 Auswertung False Negative für breitbandige Störer (Methoden der schwachen Kooperation)

86 Messungen (Kompass-Methode: 66, Random Timing: 28)

Max. Noise Increase/dB (% der maximalen Anzahl der verfügbaren Messungen pro Ausweichverfahren)

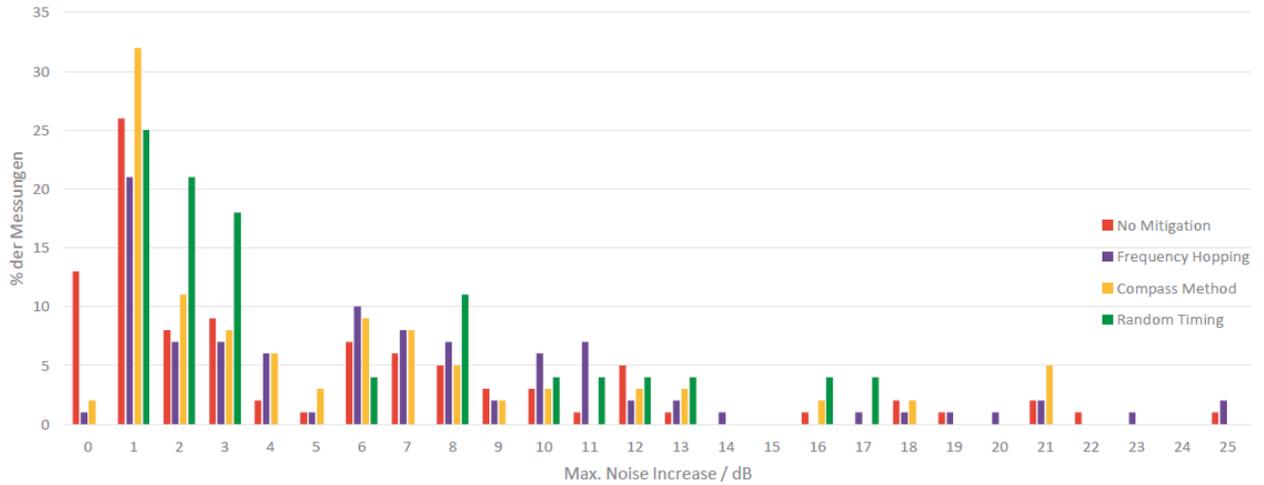


Bild 27 Auswertung max. Rauscherhöhung für breitbandige Störer (schwache Kooperation)

86 Messungen (Kompass-Methode: 66, Random Timing: 28)

Avg. Noise Increase/dB (% der maximalen Anzahl der verfügbaren Messungen pro Ausweichverfahren)

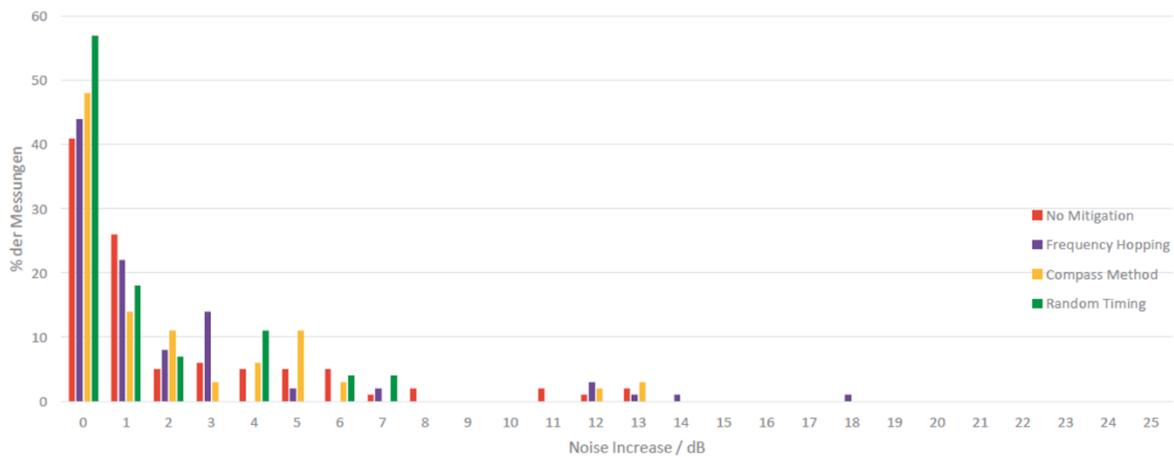


Bild 28 Auswertung mittlere Rauscherhöhung für breitbandige Störer (schwache Kooperation)

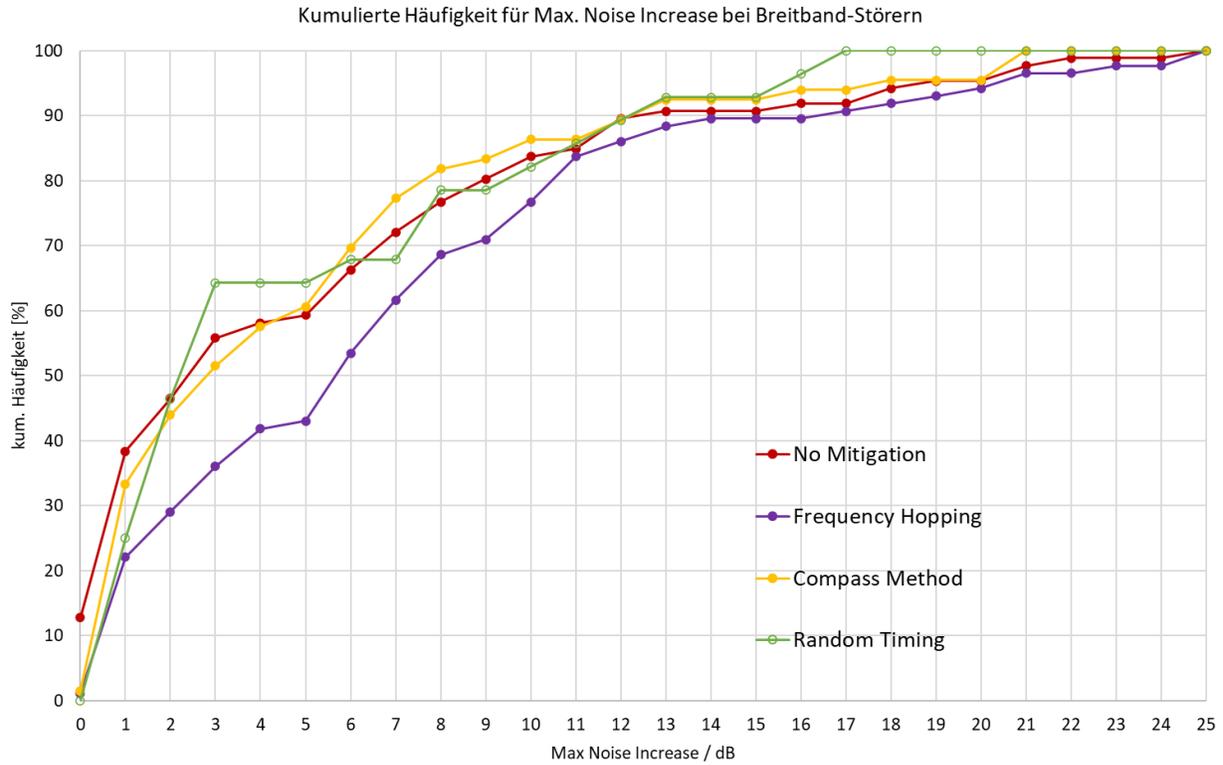


Bild 29: Kumulierte Häufigkeit Max Noise Increase für breitbandige Störer (schwache Kooperation)

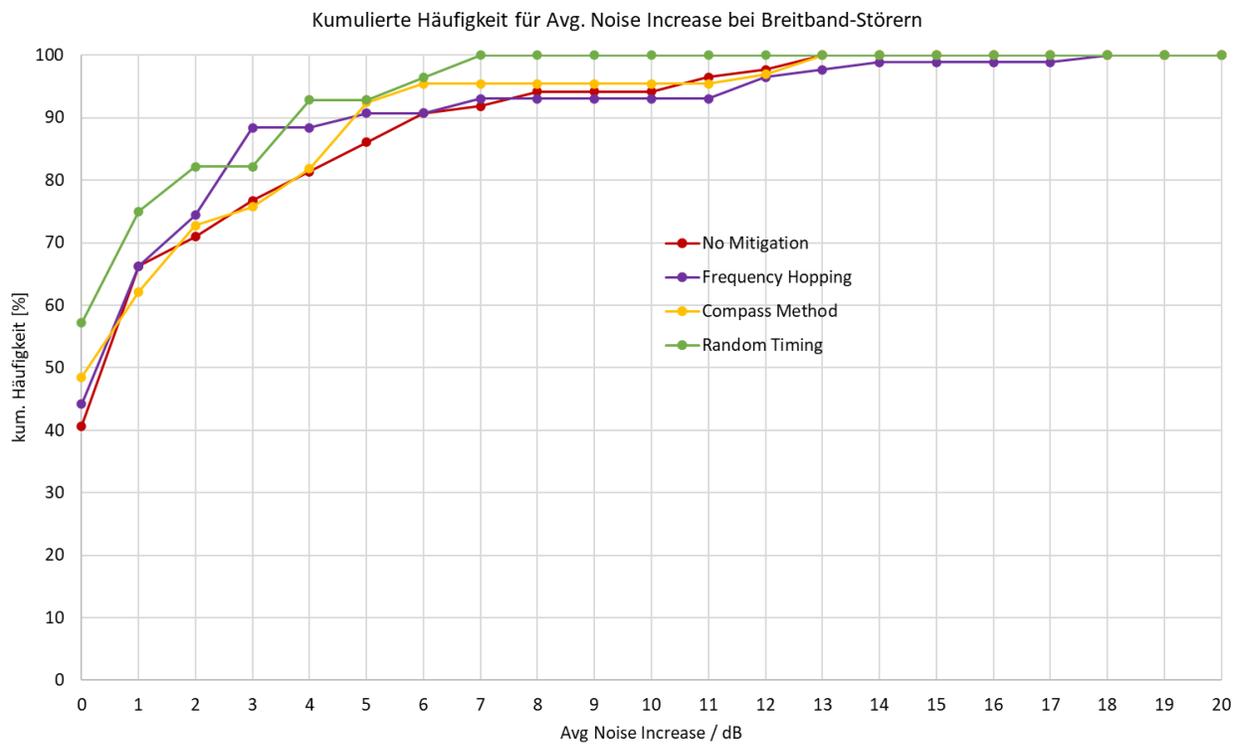


Bild 30: Kumulierte Häufigkeit Avg Noise Increase für breitbandige Störer (schwache Kooperation)

Dies ist auch wie in Bild 30 zu sehen auch der Fall. Im Bereich der Erhöhung von 2dB...7dB sind alle Verfahren etwas besser als ohne Ausweichverfahren.

Allerdings zeigt sich hier auch, dass insgesamt einfach mehr Ressourcen für die Ausweichverfahren der schwachen Kooperation benötigt werden, um eine deutliche Verbesserung zu erzielen. Dies ist bei den Breitbandstörern in Sachen Frequenzbandbreite klar ersichtlich, da diese für die Messung auf 76-77GHz beschränkt wurde.

Für eine höhere Aussagekraft der False Positive und False Negative Messparameter wird hier noch eine höhere Szenarienzahl und auch eine Betrachtung über der Zeit benötigt. Daher können sie hier nur eine Indikation für die Performanz der Verfahren geben. Auch hier sieht man, dass eine kleine mittlere Verschlechterung dieser Messparameter durch die Verfahren mehr als akzeptabel ist, solange dafür insgesamt eine maximale Verschlechterung vermieden wird (Vermeidung „bad case“). Dies ist in den Messungen andeutungsweise zu sehen und konnte durch die Simulationen in AP 6 bestätigt werden. Insgesamt bräuchte man für eine gute Aussage aber noch deutlich mehr Messungen mit weiteren Messensoren und Störern.

12.2 Zusatzergebnisse der Messungen zur schwachen Kooperation aus AP4

Neben den in Anhang 12.1 untersuchten Verfahren wurde von einem Projektpartner auch das Verfahren „Analyse before Measure“ untersucht und für schmalbandige Störer in einem Beispiel-Szenario folgende Ergebnisse erzielt:

	No Mitigation	Frequency Hopping	Analyse Before Measure
False Positive in %	25,23	5,5	0,15
False Negative in %	0	0	0
Max. Noise Increase in dB	4,8	0,7	0,5
Avg. Noise Increase in dB	0,8024	0,2251	0,0045

12.3 Messungen zur starken Kooperation

In AP 4 wurden auch von einzelnen Partnern Messungen zur starken Kooperation durchgeführt. Allerdings reicht die Datenbasis nicht für eine Anonymisierung aus. Aus den vorhandenen Messungen wurden jedoch erste Indikationen für eine hohe Wirksamkeit abgeleitet. Diese zeigte sich darin, dass die Interferenz vollständig vermieden werden konnte, wenn in den Szenarien ausreichend Ressourcen in Frequenz und Zeit vorhanden waren.