



5GLabBraWo

5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg

Partnerspezifischer Abschlussbericht des PTB

FKZ VB5GFWOPTB



Zuwendungsempfänger Physikalisch-Technische Bundesanstalt	
Projektleiter des Teilvorhabens Dr. Ahmed Sayegh	E-Mail: ahmed.Sayegh@ptb.de Telefon: +49 531 592 2242
Autoren Dr. Ahmed Sayegh	
Laufzeit des Vorhabens	1.12.2019 bis 30.06.2023

gefördert durch



Inhalt

1.	Einführung in das Projekt 5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg	3
2.	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im 5G-Reallabor	4
3.	Zusammenfassung der Arbeiten im 5G-Reallabor und Ausblick auf weitere Aktivitäten	12
	Abbildungsverzeichnis	14
	Literaturverzeichnis	14

1. Einführung in das Projekt 5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg

Der neue Mobilfunkstandard 5G gilt als Schlüsseltechnologie der Zukunft. Durch die Echtzeitfähigkeit, die Sicherstellung der Datenübertragung und die erhöhte Bandbreite nimmt 5G eine wichtige Rolle in verschiedenen Anwendungsdomänen und als Katalysator für die Technologieentwicklung ein. Gefördert vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) verfolgte das 5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg die Erforschung und lebendige Darstellung praxisnahen Bedarfs und Einsatzmöglichkeiten von 5G als Schlüsseltechnologie im Kontext einer Smart Region/Smart City. Die Förderung des Projekts erfolgte im Rahmen des 5G-Innovationsprogramms des BMDV mit dem Ziel, Deutschland als Leitmarkt für 5G-Anwendungen zu etablieren.

Zu diesem Zweck wurden ein offenes, sektorenübergreifendes Reallabor und Schaufenster für Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Politik sowie für Bürger bzw. die Gesellschaft aufgebaut und mit regionalen Plattformen und Testfeldern verknüpft. Damit soll eine Überführung von Ergebnissen in wirtschaftliche und regionale Wertschöpfungsketten sowie eine Skalierung von Lösungen gewährleistet werden.

Die unterschiedlichen Anwendungsfälle des 5G-Reallabors wurden in die bestehenden Living Labs und Testfeldaktivitäten der Region wie Anwendungsplattform intelligente Mobilität (AIM), das Testfeld Niedersachsen oder Wolfsburg Digital integriert und damit dauerhaft verfügbar gemacht. Die im 5G-Reallabor betrachteten Anwendungen wurden skalierbar gestaltet sowie parallel zum 5G-Netzausbau entwickelt und demonstriert, sodass die Migration und Implementierung von Ergebnissen in der Praxis niederschwelliger möglich wurden.

Die Umsetzung, Implementierung, Demonstration und Evaluation der praxisorientierten, teils experimentellen Anwendungsfälle, erfolgte in öffentlichen 5G-Mobilfunknetzen, die im Rahmen der regulären Netzplanung in der Projektregion ausgebaut wurden. In der Umsetzungsplanung der Anwendungsfälle fand eine enge Synchronisierung mit zwei Mobilfunknetzbetreibern (Telekom und Vodafone (Zug)) statt, sodass aktuelle Releases und weitere 5G-Technologiebausteine wie beispielsweise „Multi-Access Edge Computing“ berücksichtigt werden konnten.

In der Summe ist so ein 5G-Reallabor entstanden, in dem unterschiedlichste Anwendungsfälle für die Nutzung der 5G Technologie erprobt und demonstriert werden konnten und das entstandene Wissen und die aufgebaute Basistechnologie einem breiten Expertenkreis aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung zur Verfügung gestellt werden konnte.

Die Ergebnisse des 5G-Reallabors werden ausführlich in ihrer Gesamtheit im öffentlichen Verbundbericht des 5G-Reallabors dargestellt (Schieben et al., 2024). In diesem Bericht werden die partnerspezifischen Anteile des PTB im 5G-Reallabor vorgestellt und erläutert.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im 5G-Reallabor

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt hat sich im Berichtszeitraum in nachstehenden Arbeitspaketen engagiert:

Netz-Messung zur Passiven Intermodulation (TP1.3)

Im Berichtszeitraum wurde an den regelmäßigen Besprechungen der Teilprojektleitenden teilgenommen, wodurch eine enge Zusammenarbeit im Vorhaben erreicht wurde. Die erzielten Ergebnisse wurden bei den Konsortialtreffen, der MULCOPIM Konferenz und bei Veranstaltungen im Rahmen des 5G-Forums, wie zum Beispiel den Treffen der PIM Interest-Group, präsentiert.

Der Bericht ist in die im Antrag verwendeten Teilprojekt Arbeitspakete gegliedert.

Die Arbeiten der PTB sind in 12 Teilarbeitspakete (APs) mit 10 Meilensteinen (M) aufgeteilt. Alle APs sind innerhalb der geplanten Meilensteine erreicht worden. Der „M08 „PIM-Quellen Ortung im cm Bereich“ hing von der Phasenreferenz ab. Die PTB hat den Phasenverlauf genau charakterisiert. Basierend auf diesen Charakterisierungsdaten wurde die Berechnungsentfernung zum PIM berechnet und das Ergebnis lag innerhalb der cm-Bereichsgenauigkeit.

Die Meilensteine von TP1.3 sind in der folgenden Tabelle (Tabelle 1) mit einer Erläuterung des Status jedes Meilensteins aufgeführt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse aus den jeweiligen Arbeitspaketen beschrieben.

Tabelle 1: Meilensteine des TP1.3 PTB-Projekts

Meilenstein Nr.	Beschreibung	Status
M01	PIM-Messgerät fürs Feld	done
M02	erste kalibrierte Messung Feld	done
M03	Aufbau Labormessplatz	done
M04	Erste kalibrierte Labormessung	done
M05	Erste automatisierte Messung am Laborgerät	done
M06	Entwurf User-Guide PIM-Messungen	done
M07	User-Guide PIM-Messungen	done
M08	PIM-Quellen Ortung im cm Bereich	done
M09	Messunsicherheitsbudget	done
M10	Abschlussevent	done

Die geleisteten Arbeiten für die 12 geplanten Arbeitspakete (APs) sind nachfolgend aufgeführt:

Arbeitspaket 1:

Das Resultat aus AP1 bestand darin, ein geeignetes Messgerät für PIM im Feld und im Labor zu beschaffen. Dies beinhaltete die Anschaffung eines vektoriellen PIM-Messsystems für den Einsatz im Labor. Um diese Erwartung zu erfüllen, wurde eine Marktanalyse für die PIM-Labor-Messstation durchgeführt. Obwohl es aufgrund der Pandemie sehr schwierig war, Vor-Ort-

Besuche bei den Herstellern zu arrangieren, besuchte das Personal von TP1.3 die Messstationen bei Heuermann HF-Technik, Spinner und Rosenberger. Weitere Informationen wurden online gesammelt und als Grundlage für die Marktanalyse zur Labor-Messstation genutzt.

Nach einer kurzen Beratung mit dem Projektgeber bezüglich des geplanten Kaufs und der technischen Aspekte im April 2020 wurde die Labor-Messstation ausgeschrieben. Im Oktober 2020 wurde der Projektgeber erneut bezüglich der anfallenden Investitionskosten konsultiert.

Das Messsystem wurde anschließend bestellt, aber aufgrund von Verzögerungen, die mit der Pandemie verbunden waren, wurde es erst 2021 ins PTB-Labor geliefert, wie in Abbildung 1 gezeigt. Die zweitägige Übergabe der individuell geplanten Labor-Messstation fand Anfang Oktober 2021 durch Heuermann HF statt. Vorher reisten PTB-Mitarbeiter nach Aachen, um das System vor Ort zu inspizieren und Details zu koordinieren.

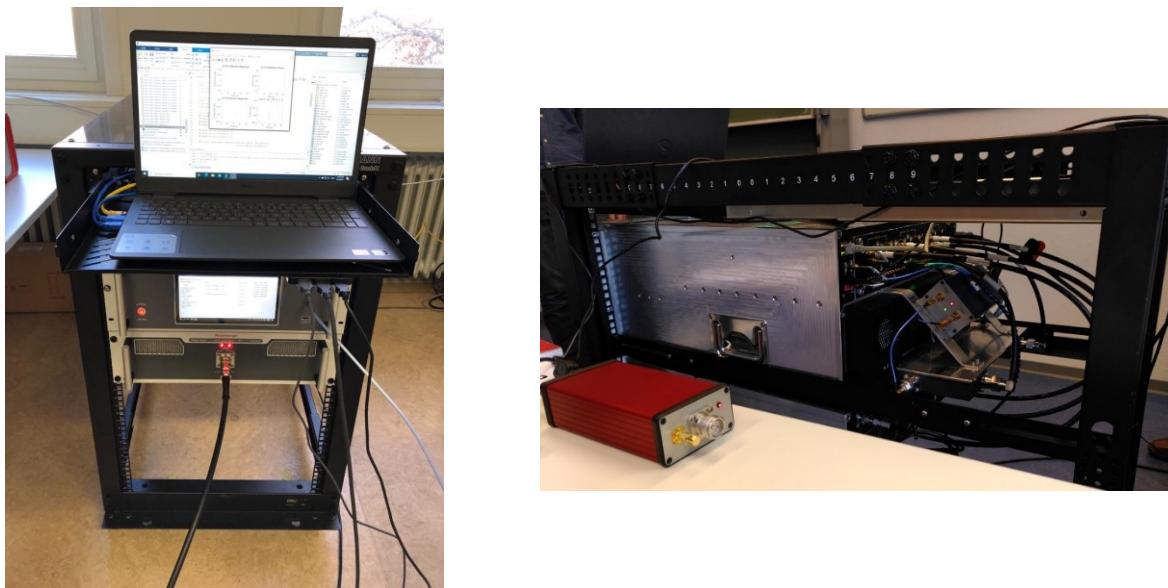


Abbildung 1. Vektorielles PIM-Messsystem im PTB-Labor.

Arbeitspaket 2:

Das erste Messunsicherheitsbudget für skalare PIM-Messungen wurde unter Verwendung der METAS UncLib Unsicherheitsbibliothek in Matlab erstellt und basiert stark auf der Norm DIN EN 62037 "Passive HF and microwave components - Measurement of intermodulation level".

Es wurden verschiedene Methoden zur Bewertung des PIM-UNSicherheitsbudgets unter Verwendung von Messdaten und Modellierungsdaten verfolgt. Die Faktoren, die das PIM-Messergebnis beeinflussen, wie z.B. die Leistung jedes einzelnen ausgesendeten Signals, wurden identifiziert und bewertet, wie in Abbildung 2 (a) und (b) gezeigt. Die Unsicherheit in Zusammenhang mit den RF-Dämpfungsgliedern, kalibrierten Messköpfen und Adapters für den Anschluss an ein anderes Steckverbinder-System wird berücksichtigt.

Die Unsicherheit, die unter Verwendung von Mess- und Modellierungsmethoden erhalten wurde, ist in Abbildung 2 (c) dargestellt. Für die Nicht-IEC-Methoden wurde das Unsicherheitsbudget unter Berücksichtigung des Beitrags von Drift und der Stabilität der Zwei-Ton-RF-Leistung berechnet.

Innerhalb von AP2 wurden die Parameter, die das Unsicherheitsbudget beeinflussen, bewertet. Dabei wurden Drift, Wiederholbarkeit und Stabilität der Trägerleistung in das Budget einbezogen. Die Ergebnisse der Unsicherheit geben einen Hinweis auf die wichtigsten Faktoren für das Unsicherheitsbudget, die bei der PIM-Messung mit einem vektoriellen PIM-System berücksichtigt werden müssen.

Arbeitspaket 3:

Trotz der Pandemie wurde während der gesamten Projektlaufzeit ein guter Kontakt zu einem lokalen Experten für PIM-Messungen und PIM-Probleme im Feld aufrechterhalten. Der technische Austausch mit dem Experten eines Netzwerkbetreibers und die Erfahrungen aus gemeinsamen Messungen sind in der Richtlinie für PIM-Messungen enthalten.

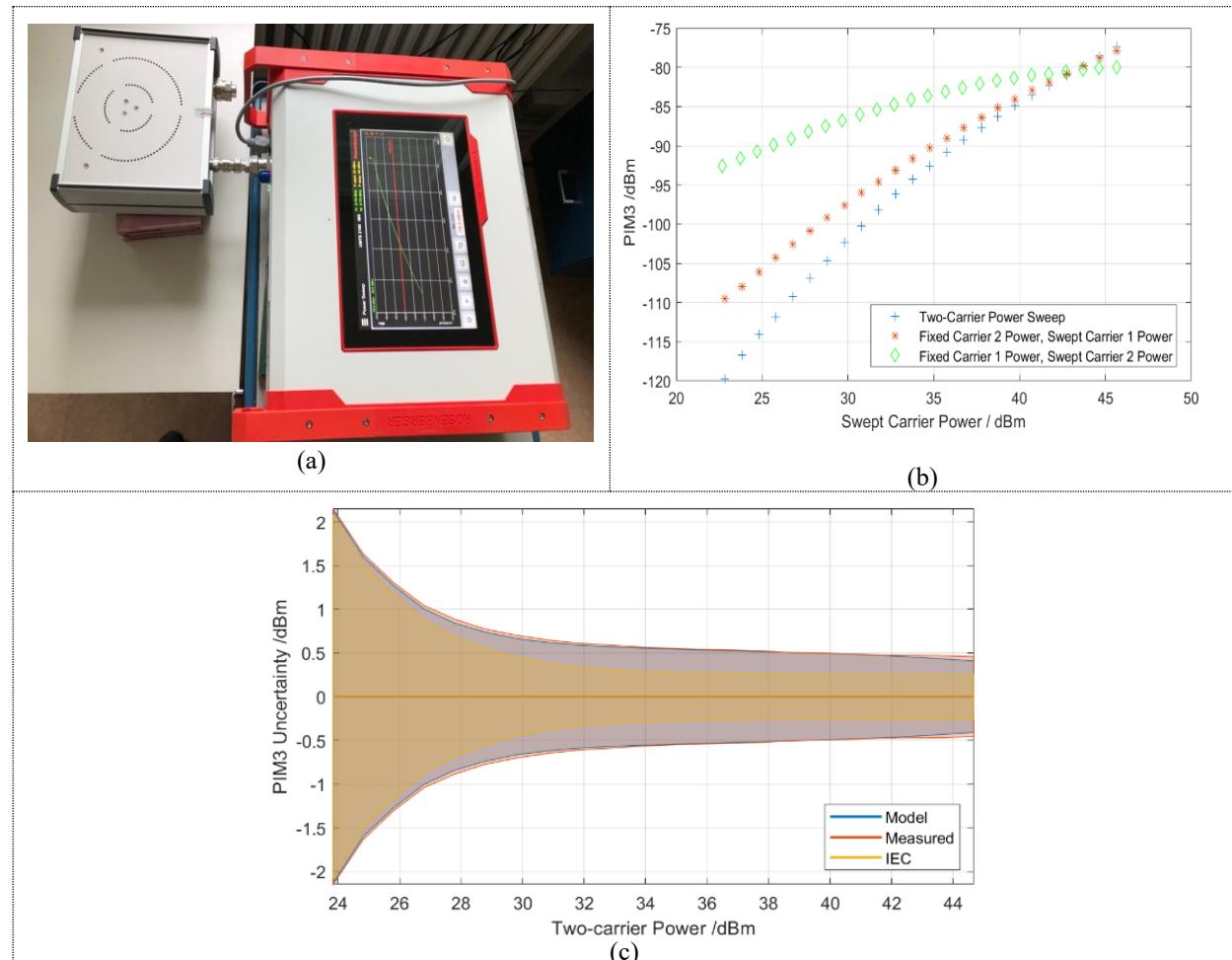


Abbildung 2. Skalares PIM-Messsystem.

Am May 2020 fand ein erstes Treffen mit der Telekom statt. Dabei wurden die geplanten Aktivitäten und Möglichkeiten zur Zusammenarbeit im Hinblick auf TP 1.3 kurz vorgestellt. Anschließend konnte Kontakt zu einem Experten der Telekom hergestellt werden, der regelmäßig PIM-Messungen an Basisstationen im Raum Braunschweig / Wolfsburg durchführt.

Am September 2020 wurden in Zusammenarbeit mit der Telekom PIM-Messungen in Peine durchgeführt. Hierfür wurde von der Telekom ein Standort mit Flachdach gewählt, um gemeinsame Messungen und Diskussionen zu ermöglichen. Der in Abbildung 3 (a) gezeigte Standort war kürzlich von einem Dienstleister mit neuen Multibandantennen ausgestattet worden, und die neue Installation musste auf PIM-Probleme überprüft werden.

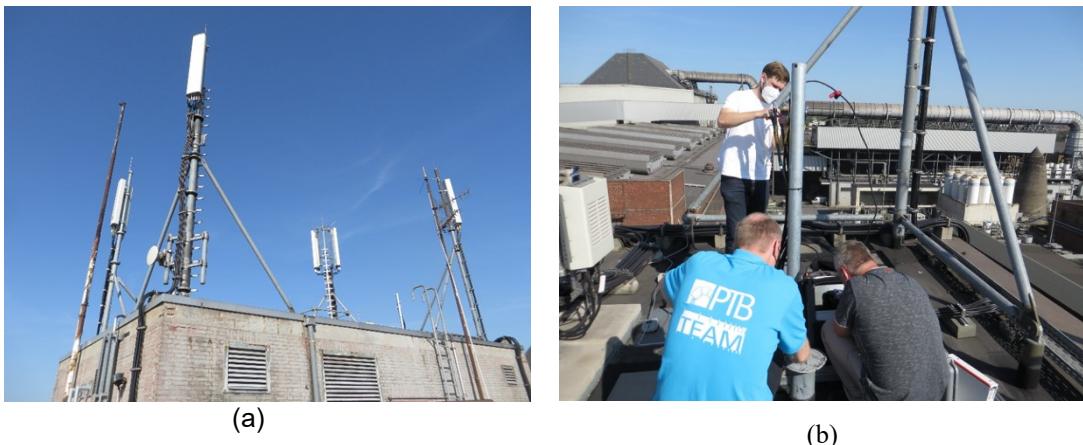


Abbildung 3. (a) Multibandantennen am Standort in Peine, (b) Durchführung einer dynamischen PIM-Messung.

Abbildung 3 (b) zeigt die Durchführung einer dynamischen PIM-Messung. Der mobile PIM-Analyzer wird hierfür an das Antennenkabel angeschlossen, und eine Messung wird für die Dauer von zehn Sekunden gestartet. Hält die Antenne während der Messung zunächst den Grenzwert ein wird mit einer leichten mechanischen Belastung (dynamischer Test) begonnen.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer solchen dynamischen PIM-Messung. Gut zu erkennen ist der Moment, in dem die mechanische Belastung (hier: leichtes Klopfen auf den Stecker) einsetzt. Es sind deutliche PIM-Probleme zu erkennen.

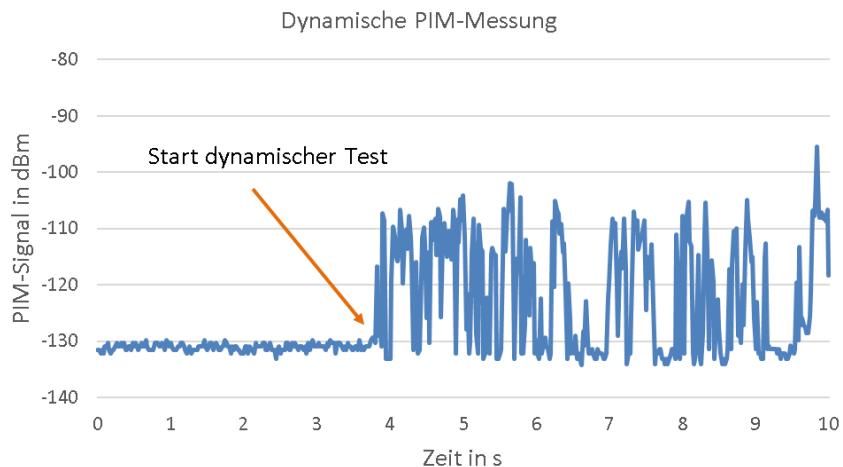


Abbildung 4. Ergebnis einer dynamischen PIM-Messung an einer Multibandantenne mit PIM-Problemen.

Aufgrund der Pandemie konnten die Messungen jedoch nicht in dem zunächst geplanten Umfang durchgeführt werden. Der fachliche Austausch mit dem Sachverständigen eines Netzbetreibers und die Erfahrungen aus gemeinsamen Messungen sind in den Leitfaden zu PIM-Messungen eingeflossen.

Arbeitspaket 4:

Das vektorielle PIM-Messsystem wurde im Oktober 2021 übergeben und konnte schnell und erfolgreich in Betrieb genommen werden. Im Rahmen von AP4 wurde die erste rückführbare PIM-Messunsicherheit mithilfe des vektoriellen PIM-Systems ermittelt. Der Without-Thru-Kalibrierungsalgorithmus wurde bereits vor der Lieferung des Messsystems in Matlab

implementiert. Großteils wurden die bekannten Messparameter der PTB verwendet. Für die erforderliche Phasenreferenz wurde eine rückführbare Charakterisierung auf SI-Einheiten durchgeführt. Mehrere Ansätze wurden verfolgt, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen und verschiedene Messergebnisse vergleichen zu können. Die Messergebnisse wurden in Zusammenarbeit mit dem 5G-Forum vor Experten aus Industrie und Forschung auf einer separaten Veranstaltung präsentiert.

Arbeitspaket 5:

Die Matlab-Software wurde zusammen mit dem Messsystem geliefert. Der Messprozess und die Auswertung der Ergebnisse wurden automatisch durchgeführt. Es wurden Matlab-Skripte erstellt, um die Messunsicherheiten aus den Rohwerten zu berechnen und sie mit anderen Kalibrierungsalgorithmen zu vergleichen. Da das PIM-Messsystem im PTB-Labor nicht für kommerzielle Zwecke gedacht war, wurde eine Kontrolle für jede einzelne Komponente durchgeführt. Die entwickelte Matlab-Software kann jede eingebaute Komponente steuern. Dadurch wurde die Kalibrierung und Messung des PIM-Systems vollständig automatisiert, was potenzielle Fehler einfach vermieden hat, und eine bessere Vergleichbarkeit der Messungen gewährleistet. Mit dieser automatisierten Software wurde das Kalibrierverfahren vereinfacht, und der Benutzer kann leicht durch detaillierte Anweisungen geführt werden.

Arbeitspaket 6:

Im PTB-Labor wurden mehrere PIM-Standards mit unterschiedlichen PIM-Pegeln charakterisiert. Die Ergebnisse des skalaren Messgeräts wurden mit den Ergebnissen verglichen, die mithilfe des vektoriellen PIM-Messsystems erzielt wurden. Die Ergebnisse beider Systeme stimmten innerhalb der Messunsicherheiten gut überein.

Diese PIM-Standards wurden mit verschiedenen Modi mithilfe des vektoriellen PIM-Systems charakterisiert. Die unterstützten Modi sind PIM über Leistungsschwankungen, PIM über Frequenzschwankungen und PIM über Phasenschwankungen. Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen können, wie z.B. die Drift aufgrund der Temperaturstabilität, wurden in das Unsicherheitsbudget einbezogen. Auf diese Weise wurde eine Wiederhol- und Reproduzierbarkeit von PIM-Messungen innerhalb des berechneten Unsicherheitsbereichs erreicht.

Arbeitspakete 7 und 8:

Die Erfahrungen, die sowohl im Labor als auch im Feld gesammelt wurden, sind in die Richtlinien für PIM-Messungen eingeflossen. Eine klare Beschreibung, wie PIM-Messungen mit SI-Rückführbarkeit durchgeführt werden, wurde in der Richtlinie gemäß Abbildung 5 bereitgestellt. Die Richtlinie wurde mit einem detaillierten Verfahren zur Bewertung verschiedener Unsicherheitsbeiträge konsolidiert. Viele Aspekte der PIM-Messunsicherheiten wurden untersucht. Beispiele hierfür sind Drift (auch aufgrund von Temperaturschwankungen), Einfluss von Leistungsschwankungen, Einfluss von Kabeln in der Messaufstellung usw.

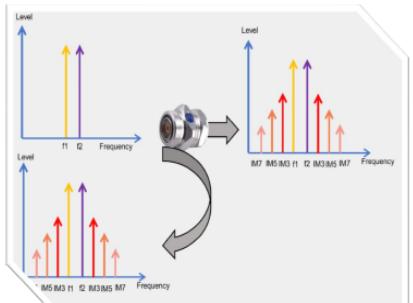
 <p>GUIDELINES ON</p> <p>TRACEABLE MEASUREMENT OF PASSIVE INTERMODULATION</p> <p>Version 0.1 (09/2022)</p> 	<p>Contents</p> <table border="0"> <tr> <td>LIST OF FIGURES</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>LIST OF TABLES</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>1 INTRODUCTION</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td> 1.1 Purpose of this guide</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td> 1.2 Comparison with previous guideline/recommendations</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td> 1.3 Scope and Applicability</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>2 Traceability chain and measurement standards</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td> 2.1 Traceability chain</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td> 2.2 Measurement standards</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>3 Measurement setup and devices</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>4 Calibration</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td> 4.1 Introduction</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td> 4.2 Calibration standards</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td> 4.3 Calibration process</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>5 Verification</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td> 5.1 Introduction</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td> 5.2 Purpose of verification</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td> 5.3 Verification methods</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td> 5.4 Practical advice for verification</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td> 5.5 Verification criteria</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>6 Measurement procedure</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>7 PIM measurement uncertainty contributors</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td> 7.1 Introduction</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td> 7.2 Identification of PIM uncertainty contributors</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td> 7.3 Characterization of uncertainty contributions</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td> 7.4 Evaluation of PIM measurement uncertainty</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>8 Evaluation of distance-to-PIM</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>9 General considerations and best practices</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Appendix A Vector-PIM measurement system devices</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>Appendix B Vectorial-PIM measurement procedure</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Appendix C PIM measurement procedure</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>Appendix D Calibration model and uncertainty contributors</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>Appendix E Characterization procedures of uncertainty contributors</td> <td>25</td> </tr> </table>	LIST OF FIGURES	3	LIST OF TABLES	4	1 INTRODUCTION	5	1.1 Purpose of this guide	5	1.2 Comparison with previous guideline/recommendations	5	1.3 Scope and Applicability	6	2 Traceability chain and measurement standards	6	2.1 Traceability chain	6	2.2 Measurement standards	6	3 Measurement setup and devices	7	4 Calibration	8	4.1 Introduction	8	4.2 Calibration standards	8	4.3 Calibration process	9	5 Verification	10	5.1 Introduction	10	5.2 Purpose of verification	10	5.3 Verification methods	10	5.4 Practical advice for verification	11	5.5 Verification criteria	11	6 Measurement procedure	11	7 PIM measurement uncertainty contributors	12	7.1 Introduction	12	7.2 Identification of PIM uncertainty contributors	12	7.3 Characterization of uncertainty contributions	13	7.4 Evaluation of PIM measurement uncertainty	15	8 Evaluation of distance-to-PIM	15	9 General considerations and best practices	15	Appendix A Vector-PIM measurement system devices	19	Appendix B Vectorial-PIM measurement procedure	20	Appendix C PIM measurement procedure	22	Appendix D Calibration model and uncertainty contributors	23	Appendix E Characterization procedures of uncertainty contributors	25
LIST OF FIGURES	3																																																																		
LIST OF TABLES	4																																																																		
1 INTRODUCTION	5																																																																		
1.1 Purpose of this guide	5																																																																		
1.2 Comparison with previous guideline/recommendations	5																																																																		
1.3 Scope and Applicability	6																																																																		
2 Traceability chain and measurement standards	6																																																																		
2.1 Traceability chain	6																																																																		
2.2 Measurement standards	6																																																																		
3 Measurement setup and devices	7																																																																		
4 Calibration	8																																																																		
4.1 Introduction	8																																																																		
4.2 Calibration standards	8																																																																		
4.3 Calibration process	9																																																																		
5 Verification	10																																																																		
5.1 Introduction	10																																																																		
5.2 Purpose of verification	10																																																																		
5.3 Verification methods	10																																																																		
5.4 Practical advice for verification	11																																																																		
5.5 Verification criteria	11																																																																		
6 Measurement procedure	11																																																																		
7 PIM measurement uncertainty contributors	12																																																																		
7.1 Introduction	12																																																																		
7.2 Identification of PIM uncertainty contributors	12																																																																		
7.3 Characterization of uncertainty contributions	13																																																																		
7.4 Evaluation of PIM measurement uncertainty	15																																																																		
8 Evaluation of distance-to-PIM	15																																																																		
9 General considerations and best practices	15																																																																		
Appendix A Vector-PIM measurement system devices	19																																																																		
Appendix B Vectorial-PIM measurement procedure	20																																																																		
Appendix C PIM measurement procedure	22																																																																		
Appendix D Calibration model and uncertainty contributors	23																																																																		
Appendix E Characterization procedures of uncertainty contributors	25																																																																		

Abbildung 5. Inhaltsverzeichnis der PIM-Richtlinie.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass verschiedene Absorbermaterialien signifikante PIM-Signale verursachen. Da in der Fachliteratur keine Studien dazu gefunden werden konnten, wurden Messungen an Absorbermaterialien verschiedener Hersteller auf dem Freifeld der PTB durchgeführt (siehe Abbildung 6). Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden auf der MULCOPIM-Konferenz in Spanien im Jahr 2022 veröffentlicht.

**Abbildung 6.** PIM-Messung an Absorbermaterial auf dem Freifeld der PTB.

Arbeitspaket 9:

Für eine genaue Bewertung der PIM-Messunsicherheit wird im Labor das vektorielle PIM-Messsystem verwendet. Es handelt sich um ein VNA-basiertes PIM-System mit zwei HF-Leistungsverstärkern, die von einer MatLab-Software gesteuert werden. Vor der Durchführung

einer PIM-Messung muss das System kalibriert werden. Fünf Kalibrierstandards werden, wie in Abbildung 7 gezeigt, für die Kalibrierung des PIM-Systems verwendet: Open, Short, Load, Leistungssensor und Phasenreferenz.

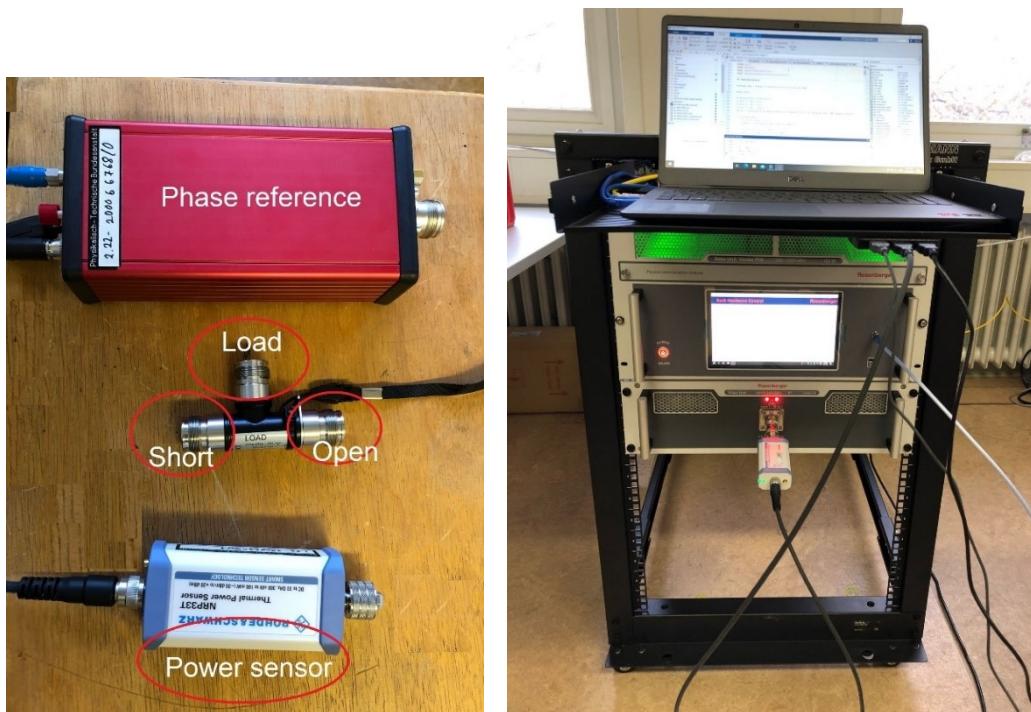


Abbildung 7. Foto der Kalibrierstandards für das vektorielle PIM-System.

Nachdem die Kalibrierung abgeschlossen ist, können die PIM-Messungen gestartet werden. Dazu wird ein PIM-Standard, der als PIM-Quelle dient, an das Messsystem angeschlossen und die Messung gestartet, wie in Abbildung 8 dargestellt. Während der PIM-Messung sind die beiden Verstärker aktiv und die Messungen sind nach wenigen Sekunden abgeschlossen.



Abbildung 8. Foto einer PIM-Messung mit einer PIM-Quelle und einer Last.

Schließlich werden die gemessenen Rohdaten mit dem "Without Thru Calibration Algorithmus" korrigiert. Abbildung 9 zeigt die fehlerkorrigierte Amplitude und Phase des PIM-Signals IM3.

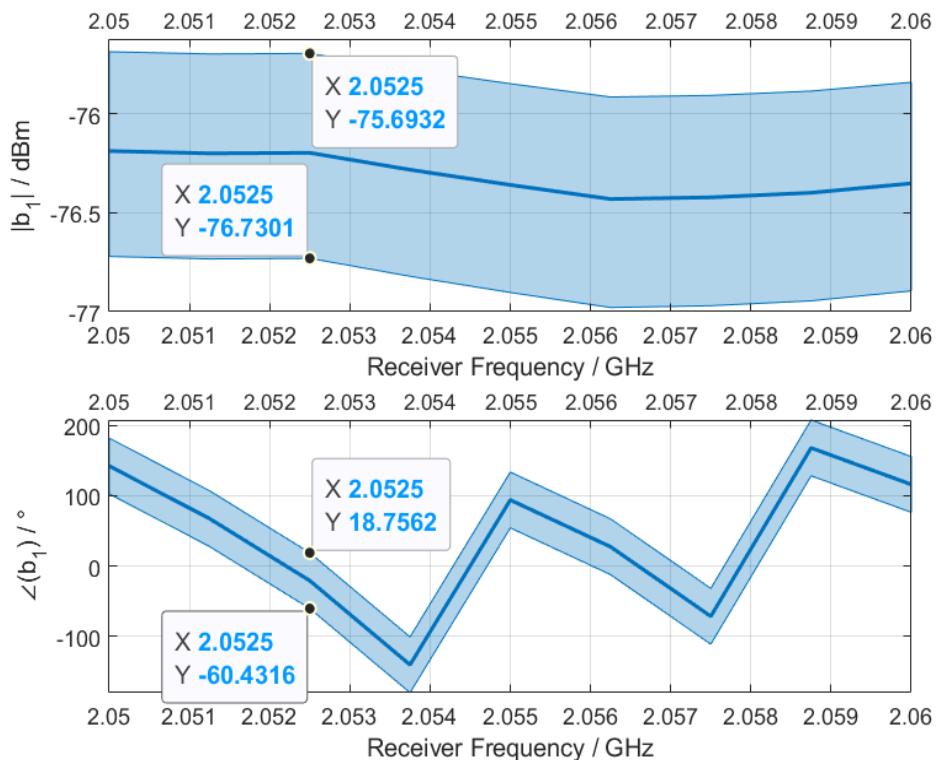


Abbildung 9. Gemessene PIM (3. PIM-Produkt, Betrag und Phase) mit Unsicherheit.

Die Messunsicherheit des PIM-Betrags des vektoriellen PIM-Systems ist viel kleiner als die, die mit dem skalaren PIM-System erreicht wird. Die Standardunsicherheit des gemessenen PIM-Betrags beträgt weniger als 0,3 dB, wie in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt. Die erhaltene Unsicherheit ist durch die Verwendung von SI-rückführbaren Kalibrierungsstandards, die in Abbildung 10 aufgeführt sind, auf SI-Einheiten rückführbar. Die SOL-Kalibrierstandards, der Leistungssensor und die Systemlinearität stellen die drei Haupteinflussgrößen für das Unsicherheitsbudget dar, wie gezeigt in Abbildung 10.

② b1:III_p1:III Mag / dBm @ 2,050 GHz			
Id		Flat	Expand All
Collapse All		Numeric Format:	f6
			Copy
Value	Std Unc	U95	IM3 Betrag
-76,187053	0,263941	0,527882	
Description			Unc Component
+ Calibration Standard			0,164125
+ Connector Repeatability			0,007549
+ Phase Calibration Standard			0,000000
+ PowerSensor			0,126318
+ VNA Drift (Ideal VNA correlated)			0,003166
+ VNA Linearity			0,157330
+ VNA Noise			0,044184

Abbildung 10. Unsicherheitsbudget des gemessenen 3. PIM-Produkts.

Arbeitspaket 10:

Im Rahmen der Arbeit hat die PTB im Standardisierungsausschuss IEC TC 46 für Kabel, Drähte, Hohlleiter, HF-Steckverbinder, HF- und Mikrowellen-Passivkomponenten und Zubehör, WG 6 Passive Intermodulation Measurement (PIM), mitgearbeitet. Derzeit wird ein internationaler Ringvergleich unter den Mitgliedern des Gremiums geplant. Die PTB wird an dem Vergleich teilnehmen. Allerdings wird der Abschluss des Vergleichs voraussichtlich erst nach dem Ende des Projekts erfolgen.

Arbeitspaket 12:

Im Hinblick auf die geplanten Transfermaßnahmen wurden zusätzlich zur Teilnahme am Normungsausschuss umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt. Insbesondere wurden mehrere Vorträge in den Jahren 2021 und 2022 bei Online-Meetings mit Experten aus Industrie und Forschung gehalten. Die während des Fortschritts der Arbeit erzielten Ergebnisse wurden auch auf Konsortialtreffen und Veranstaltungen des 5G Forums präsentiert. Darüber hinaus wurden zwei Artikel auf der MULCOPIM-Konferenz in Spanien im Jahr 2022 veröffentlicht. Die erstellte Richtlinie für PIM-Messungen wurde an viele Partner in Forschung und Industrie verteilt, und es wurden positive Rückmeldungen erhalten.

3. Zusammenfassung der Arbeiten im 5G-Reallabor und Ausblick auf weitere Aktivitäten

Im 5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg wurden die Nutzungsmöglichkeiten von 5G im Rahmen einer Smart Region/Smart City in der Projektlaufzeit von dreieinhalb Jahren (2019-2023) erfolgreich erforscht, erprobt und dargestellt. Das 5G-Reallabor war in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg fest verankert und nutzte die dort bereits aufgebaute Testfeldinfrastruktur wie das Testfeld Niedersachsen und das Testfeld Digitale Mobilität in Wolfsburg.

Im PTB-Labor wurde ein vektorielles PIM-Messsystem für die PIM-Messung aufgebaut, das sowohl die Amplitude als auch die Phase des PIM-Signals präzise messen kann. Dieses System muss jedoch vor den PIM-Messungen kalibriert werden. Ein Kalibrierungsalgorithmus namens "WithoutThru" wurde verwendet, um den Fehlerkorrekturprozess durchzuführen. Dieser Algorithmus erfordert fünf Kalibrierstandards: Short, Open, Load, Leistungssensor und Phasenreferenz. Diese Kalibrierstandards wurden an der PTB mit Rückführbarkeit auf SI-Einheiten charakterisiert.

Mit diesen Kalibrierstandards war das vektorielle PIM-Messsystem in der Lage, PIM präzise und rückführbar auf SI-Einheiten zu messen. Für bessere Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen wurden die Kalibrierungs- und Messprozesse vollständig automatisiert, wobei eine Matlab-Software verwendet wurde. Die Automatisierung hilft, potenzielle Fehler und Risiken, die aufgrund von Bedienungsfehlern auftreten könnten, zu vermeiden.

Zur Verifizierung und Validierung des vektoriellen PIM-Systems wurden mehrere PIM-Standards sowohl mit dem skalaren als auch mit dem vektoriellen PIM-System getestet. Die Ergebnisse des vektoriellen PIM-Systems wiesen eine geringere Unsicherheit auf und lagen innerhalb des Unsicherheitsbereichs des skalaren PIM-Systems.

Im Rahmen des Projekts wurde eine enge Zusammenarbeit mit Netzbetreibern und Herstellern von Messtechnik für passive Intermodulation aufgebaut. Dies fördert den Fortschritt der kommerziellen PIM-Messtechnik. In diesem Zusammenhang wurden gemeinsam mit dem Telekommunikationsunternehmen auch PIM-Messungen im Feld durchgeführt.

Die Messunsicherheit bei Verwendung des vektoriellen PIM-Systems wurde unter Berücksichtigung nicht nur der Kalibrierungsstandards, sondern auch der Drift, Linearität und des Systemrauschens bewertet. Es wurde außerdem festgestellt, dass Umgebungstemperatur und HF-Leistungspegel einen signifikanten Einfluss auf das gemessene PIM haben. Daher

sollte das vektorielle PIM-System in einem temperaturkontrollierten Labor betrieben werden, um den Einfluss von Drift zu minimieren. Das Unsicherheitsbudget wurde in einem neuen Ansatz im Vergleich zur vorhandenen Methode in IEC 62037-1 berechnet. Die Kalibrierungsstandards Short-Open-Load, Leistungssensor und Linearität waren die drei Hauptbeiträge zum Unsicherheitsbudget der PIM-Amplitude. Das vektorielle PIM-System war in der Lage, PIM mit einer Unsicherheit von weniger als ± 0.3 dB für PIM-Quellen von etwa -80 dBm. Dieses System verbessert die Messung Kalibrierungsfähigkeiten der PTB als deutsches NMI und unterstützt die Industrie dabei, ihre PIM-Messgenauigkeit zu verbessern. Es ist erwähnenswert, dass es sich bei diesem Projekt um die weltweit erste Messung der PIM-Phase handelte. Die Phasenverschiebung des PIM-Signals relativ zum PIM an der Kalibrierungsebene wird dann zur Berechnung der Entfernung zur PIM-Quelle (DTPIM) verwendet. Die erhaltenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die DTPIM erfolgreich mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich bestimmt werden konnte.

Die Erkenntnisse und die Erfahrungen aus den PIM-Messungen im Labor und im Feld wurden in Form einer Richtlinie für rückführbare PIM-Messungen zusammengefasst. Diese Richtlinie wird künftig auf der PTB-Website frei zugänglich sein. Die PTB arbeitet auch mit der Europäische Vereinigung nationaler Metrologieinstitute (Euramet), um die entwickelten Richtlinien als Euramet-Richtlinien (Good Practice Guides) für bewährte Verfahren der PIM-Messung zu etablieren. Darüber hinaus dient diese Richtlinie als wichtige Grundlage für die Standardisierung und Ausschussarbeit von zum Beispiel in der Gruppe IEC TC 46 Kabel, Drähte, Hohlleiter, HF-Steckverbinder, HF- und Mikrowellen-Passivkomponenten und Zubehör sowie der WG 6 Passive Intermodulation Measurement.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Vektorielles PIM-Messsystem im PTB-Labor.	5
Abbildung 2. Skalares PIM-Messsystem.	6
Abbildung 3. (a) Multibandantennen am Standort in Peine, (b) Durchführung einer dynamischen PIM-Messung.	7
Abbildung 4. Ergebnis einer dynamischen PIM-Messung an einer Multibandantenne mit PIM-Problemen.	7
Abbildung 5. Inhaltsverzeichnis der PIM-Richtlinie.	9
Abbildung 6. PIM-Messung an Absorbermaterial auf dem Freifeld der PTB.	9
Abbildung 7. Foto der Kalibrierstandards für das vektorielle PIM-System.	10
Abbildung 8. Foto einer PIM-Messung mit einer PIM-Quelle und einer Last.	10
Abbildung 9. Gemessene PIM (3. PIM-Produkt, Betrag und Phase) mit Unsicherheit.	11
Abbildung 10. Unsicherheitsbudget des gemessenen 3. PIM-Produkts.	11

Literaturverzeichnis

- Sayegh, A., Gellersen, F., Stein, F., & Kuhlmann, K. (2022). Evaluation and Comparison of PIM Measurement Uncertainty using Different Methods. PTB-OAR.
- Sayegh, A., Kuhlmann, K., Gellersen, F., & Kleine-Ostmann, T. (2022). On-site Measurement and Comparison of Passive Intermodulation generated from different RF absorbers. International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation (MULCOPIM).
- Schieben et al. (2024). Projektergebnisse des 5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg - Schlussbericht des Verbundvorhabens. Technische Informationsbibliothek (TIB).

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel 5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg Partnerspezifischer Abschlussbericht des PTB		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Sayegh, Ahmed		5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.6.2023
		6. Veröffentlichungsdatum Noch offen
		7. Form der Publikation TIB Hannover
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Bundesallee 100 38116 Braunschweig, Germany		9. Ber. Nr. Durchführende Institution n/a
		10. Förderkennzeichen FKZ VB5GFWOPTB
		11. Seitenzahl 14
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) Invalidenstraße 44 10115 Berlin		13. Literaturangaben 3
		14. Tabellen 1
		15. Abbildungen 10
16. Zusätzliche Angaben n/a		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) n/a		
18. Kurzfassung Gefördert vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) verfolgte das 5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg die Erforschung und lebendige Darstellung von einem praxisnahen Bedarf und von Einsatzmöglichkeiten von 5G als Schlüsseltechnologie im Kontext einer Smart Region/Smart City. Zu diesem Zweck wurden ein offenes, sektorenübergreifendes Reallabor und Schaufenster für Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Politik sowie für Bürger bzw. die Gesellschaft erfolgreich aufgebaut und mit regionalen Plattformen und Testfeldern verknüpft. In den Arbeiten im 5G-Reallabor ist es gelungen, ein vektorielles PIM-Messsystem für die PIM-Messung aufgebaut, das sowohl die Amplitude als auch die Phase des PIM-Signals präzise messen kann. Dieses System muss jedoch vor den PIM-Messungen kalibriert werden. Ein Kalibrierungsalgorithmus namens "WithoutThru" wurde verwendet, um den Fehlerkorrekturprozess durchzuführen. Dieser Algorithmus erfordert fünf Kalibrierstandards: Short, Open, Load, Leistungssensor und Phasenreferenz. Diese Kalibrierstandards wurden an der PTB mit Rückführbarkeit auf SI-Einheiten charakterisiert. Die Messunsicherheit bei Verwendung des vektoriellen PIM-Systems wurde unter Berücksichtigung nicht nur der Kalibrierungsstandards, sondern auch der Drift, Linearität und des Systemrauschens bewertet. Es wurde außerdem festgestellt, dass Umgebungstemperatur und HF-Leistungspegel einen signifikanten Einfluss auf das gemessene PIM haben. Daher sollte das vektorielle PIM-System in einem temperaturkontrollierten Labor betrieben werden, um den Einfluss von Drift zu minimieren. Das vektorielle PIM-System war in der Lage, PIM mit einer Unsicherheit von weniger als ± 0.3 dB für PIM-Quellen von etwa -80 dBm. Es ist erwähnenswert, dass es sich bei diesem Projekt um die weltweit erste Messung der PIM-Phase handelte. Die Phasenverschiebung des PIM-Signals relativ zum PIM an der Kalibrierungsebene wird dann zur Berechnung der Entfernung zur PIM-Quelle (DTPIM) verwendet. Die erhaltenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die DTPIM erfolgreich mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich bestimmt werden konnte. Die Erkenntnisse und die Erfahrungen aus den PIM-Messungen im Labor und im Feld wurden in Form einer Richtlinie für rückführbare PIM-Messungen zusammengefasst. Diese Richtlinie wird künftig auf der PTB-Website frei zugänglich sein.		
19. Schlagwörter Mobilfunk, 5G, Passive Intermodulation (PIM)		
20. Verlag n/a	21. Preis n/a	

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report	
3. title 5G real laboratory in the Braunschweig-Wolfsburg mobility region Partner-specific PTB final report		
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Sayegh, Ahmed		5. end of project 30.6.2023
		6. publication date Still open
		7. form of publication TIB Hannover
8. performing organization(s) (name, address) Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Bundesallee 100 38116 Braunschweig, Germany		9. originator's report no. n/a
		10. reference no. FKZ VB5GFWOPTB
		11. no. of pages 14
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV) Invalidenstraße 44 10115 Berlin Germany		13. no. of references 3
		14. no. of tables 1
		15. no. of figures 10
16. supplementary notes n/a		
17. presented at (title, place, date) n/a		
18. abstract With funding from the Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV), the 5G RealLabor in the Braunschweig-Wolfsburg mobility region pursued the research and livable presentation of practical needs and possible applications of 5G as a key technology in the context of a smart region/smart city. For this purpose, an open, cross-sector Reallabor laboratory with showcase for actors from business, science, administration, and politics as well as for citizens and society was successfully established and linked to regional platforms and test fields. The work in the 5G real laboratory has succeeded in setting up a vectorial PIM measurement system for PIM measurement that can precisely measure both the amplitude and the phase of the PIM signal. However, this system must be calibrated before the PIM measurements can be taken. A calibration algorithm called "WithoutThru" was used to perform the error correction process. This algorithm requires five calibration standards: short, open, load, power sensor and phase reference. These calibration standards were characterized at PTB with traceability to SI units. The measurement uncertainty using the vectorial PIM system was evaluated taking into account not only the calibration standards but also the drift, linearity and system noise. It was also found that ambient temperature and RF power level have a significant influence on the measured PIM. Therefore, the vector PIM system should be operated in a temperature-controlled laboratory to minimize the influence of drift. The vector PIM system was able to measure PIM with an uncertainty of less than ± 0.3 dB for PIM sources of about -80 dBm. It is worth noting that this project was the world's first measurement of PIM phase. The phase shift of the PIM signal relative to the PIM at the calibration plane is then used to calculate the distance to the PIM source (DTPIM). The results obtained indicate that the DTPIM could be successfully determined with an accuracy in the centimeter range. The findings and experience from the PIM measurements in the laboratory and in the field were summarized in the form of a guideline for traceable PIM measurements. This guideline will be freely accessible on the PTB website in the future.		
19. keywords Mobile communications, 5G, Passive Intermodulation		
20. publisher n/a		21. price n/a