



Produkt: ZVK

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

Application Note

Messabweichungen, die durch systematische Messfehler eines Netzwerkanalysesystems hervorgerufen werden, lassen sich durch geeignete Systemfehlerkalibrierungen drastisch reduzieren. Die nach der Systemfehlerkorrektur noch verbleibenden Messunsicherheiten werden - außer durch die Stabilität, Linearität und Dynamik des Netzwerkanalysators - im Wesentlichen durch die Qualität der Kalibrierstandards und die Wiederholbarkeit der Steckverbindungen hervorgerufen. Die effektive Messgenauigkeit des Netzwerkanalysesystems lässt sich mit Hilfe von Verifikationsmessungen bestimmen, wobei hochpräzise Verifizierstandards Verwendung finden.



Inhalt

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Überblick..... | 2 |
| 2 | Kalibrierung..... | 2 |
| 3 | Verifikation..... | 3 |
| 4 | Messunsicherheit bei Transmissionsmessungen..... | 5 |
| | Messunsicherheit für angepasste Messobjekte | 5 |
| | Messunsicherheit für fehlangepasste Messobjekte..... | 22 |
| 5 | Messunsicherheit bei Reflexionsmessungen | 27 |
| 6 | Effektive Systemdaten | 33 |
| 7 | Zusammenfassung | 53 |
| 8 | Weitere Applikationsschriften | 53 |
| 9 | Bestellangaben | 54 |

1 Überblick

Messabweichungen, die durch systematische Messfehler eines Netzwerkanalysesystems hervorgerufen werden, lassen sich durch geeignete Systemfehlerkalibrierungen drastisch reduzieren. Die nach der Systemfehlerkorrektur noch verbleibenden Messunsicherheiten werden - außer durch die Stabilität, Linearität und Dynamik des Netzwerkanalysators - im Wesentlichen durch die Qualität der Kalibrierstandards und die Wiederholbarkeit der Steckverbindungen hervorgerufen. Die effektive Messgenauigkeit des Netzwerkanalysesystems lässt sich mit Hilfe von Verifikationsmessungen bestimmen, wobei hochpräzise Verifizierstandards Verwendung finden.

2 Kalibrierung

Zur Kalibrierung des Netzwerkanalysators ZVK für den gesamten Frequenzbereich bis 40 GHz wurde ein koaxialer Kalibriersatz mit 2,92-mm-Anschlüssen des Typs 8770N03 (von Maury Microwave Corporation, USA) verwendet. Dieser Kalibriersatz kann auch direkt über Rohde & Schwarz bezogen werden (Kalibriersatz ZV-Z35, R&S-Bestellnummer 1128.3547.02). Er enthält unterschiedliche Kalibrierstandards, und zwar

- **OPEN** (Leerlauf),
- **SHORT** (Kurzschluss), und
- **MATCH** (Abschluss).

Die charakteristischen Daten der Standards (wie elektrische Längen und Koeffizienten der Leerlaufstreakapazität) sind auf einer Diskette gespeichert, die zum Lieferumfang des Kalibriersatzes gehört. Er enthält auch zwei Gleitlasten (engl.: „Sliding MATCHES“, oft auch „Sliding Terminations“ oder „Sliding Loads“ genannt). Mit ihrer Hilfe lässt sich für Frequenzen oberhalb von 4 GHz eine höhere effektive Direktivität erzielen als mit festen Abschlusswiderständen („Fixed MATCH“), deren Reflexionsfaktor typischerweise mit der Frequenz stark ansteigt.

Zusätzlich wurde der Netzwerkanalysator auch mit Hilfe eines 3,5-mm-Kalibriersatzes 85052B (der Firma Agilent Technologies, USA) kalibriert. Der größere Durchmesser von 3,5 mm (im Vergleich zu 2,92 mm) erleichtert die Erzielung einer noch höheren Präzision der Kalibrierstandards. Leider

können sie jedoch aufgrund ihres größeren Durchmessers nur bis zu einer Frequenz von 26.5 GHz verwendet werden.

An die beiden Messtore (PORT) des Netzwerkanalysators wurden Messkabel (der Firma W. L. Gore & Associates, USA) mit der Typbezeichnung FD0BS0HR025.0 angeschlossen. Diese Kabel weisen an einem Ende einen mechanisch besonders stabilen Übergang auf, der speziell für die Messtore des ZVK geeignet ist. An ihrem anderen Ende befinden sich präzise 2,92-mm-Stecker. Diese Anschlüsse dienen als Referenzebenen, an denen die Kalibrierungen und Verifizierungen durchgeführt wurden und Messobjekte (MO) angeschlossen werden können. Im Fall der 3,5-mm-Messungen wurden diese Ebenen mit Hilfe von Adaptern aus dem Kalibriersatz 85052B auf 3,5 mm umgerüstet. Alle Messungen wurden in einem üblichen Laborraum ohne spezielle Klimatisierung durchgeführt.

Als mögliche Kalibriermethoden bietet der Netzwerkanalysator ZVK eine besonders reichhaltige Palette an (TOM, TRM, TRL, TNA, TOSM und TOM-X). Die Wahl fiel auf das TOM-Verfahren (R&S-Patent). Es verwendet drei unterschiedliche Typen von Kalibrierstandards, nämlich **T** = THROUGH (Durchverbindung), **O** = OPEN (Leerlauf) und **M** = MATCH (Abschluss). Es ist einfach durchzuführen und speziell für koaxiale Kalibrierungen besonders gut geeignet. Es ist präzise und gestattet die gleichzeitige Verwendung eines Messtores mit einer Buchse und des anderen mit einem Stecker. Dies ist erforderlich, da die zur Verfügung stehenden Verifizierstandards alle einem Ende einen Stecker und am anderen eine Buchse aufweisen.

3 Verifikation

Zur Bestimmung der effektiven Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators nach Systemfehlerkorrektur wurde im Fall der 2,92-mm-Steckverbinder der Verifiziersatz 3668 (der Firma Anritsu, USA) verwendet. Er enthält vier Verifizierstandards. Im einzelnen sind dies

- eine angepasste, homogene 50-Ω-Luftleitung,
- ein angepasstes 20-dB-Dämpfungsglied,
- ein angepasstes 50-dB-Dämpfungsglied und
- eine fehlangepasste gestufte 50-Ω-Luftleitung, die eine 25-Ω-Leitungssektion enthält (Beatty-Standard).

Alle S-Parameter dieser 2,92-mm-Verifizierstandards wurden vom Hersteller durch eigene Messungen möglichst präzise bestimmt. Er gibt hierzu an: *"The components in the kits are of the highest quality and accuracy. All components are NIST (National Institute of Standards and Technology of the USA) traceable, which means that the components are very accurate and repeatable."*

Die Ergebnisse dieser Verifiziermessungen inklusive der dazugehörigen Messunsicherheitsangaben gehören zum Lieferumfang des Verifiziersatzes und sind auf einer Datendiskette gespeichert. Als Beispiel werden in den folgenden Tabellen die Angaben für die höchste Frequenz 40 GHz dargestellt (Tabelle 3-1 Betrag; Tabelle 3-2 Phase).

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

Tabelle 3-1 Betragsangaben für den **2,92-mm-Verifiziersatz** bei 40 GHz

| Verification Standard | S11 | | S21 | | S12 | | S22 | |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | MAG lin | UNC +/- | MAG /dB | UNC +/- | MAG /dB | UNC +/- | MAG lin | UNC +/- |
| 50 Ω | .006 | .010 | -0.204 | .154 | -0.200 | .154 | .008 | .010 |
| 20 dB | .078 | .010 | -19.989 | .154 | -19.982 | .154 | .085 | .010 |
| 50 dB | .037 | .010 | -49.593 | .424 | -49.602 | .424 | .128 | .010 |
| 25 Ω | .585 | .054 | -2.137 | .154 | -2.140 | .154 | .584 | .054 |

Tabelle 3-2 Phasenangaben für den **2,92-mm-Verifiziersatz** bei 40 GHz

| Verification Standard | S11 | | S21 | | S12 | | S22 | |
|--------------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | ANG /Deg | UNC +/- | ANG /Deg | UNC +/- | ANG /Deg | UNC +/- | ANG /Deg | UNC +/- |
| 50 Ω | -163.9 | 180.0 | -7.06 | 8.90 | -7.04 | 8.90 | -6.81 | 180.0 |
| 20 dB | -37.94 | 11.34 | -164.15 | 8.90 | -164.29 | 8.90 | 70.87 | 10.74 |
| 50 dB | 2.87 | 19.86 | 127.65 | 6.62 | 127.51 | 6.62 | 122.3 | 8.47 |
| 25 Ω | 75.54 | 9.30 | -17.35 | 8.90 | -16.16 | 8.90 | 75.17 | 9.30 |

Darüber hinaus wurden auch Verifikationen mit 3,5-mm-Standards durchgeführt. Hierzu wurde der Verifiziersatz 85053B (von Agilent Technologies) verwendet. Die beiden folgenden Tabellen (Tabelle 3-3 Betrag; Tabelle 3-4 Phase) geben für den 3,5-mm-Präzisionsverifiziersatz die Herstellerwerte als Beispiel für die Frequenz 20 GHz an.

Tabelle 3-3 Betragsangaben für den **3,5-mm-Verifiziersatz** bei 20 GHz

| Verification Standard | S11 | | S21 | | S12 | | S22 | |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | MAG lin | UNC +/- | MAG /dB | UNC +/- | MAG /dB | UNC +/- | MAG lin | UNC +/- |
| 50 Ω | .00017 | .00367 | -.203 | .015 | -.202 | .015 | .00129 | .00371 |
| 20 dB | .03096 | .00214 | -20.343 | .019 | -20.349 | .019 | .02080 | .00234 |
| 40 dB | .04994 | .00213 | -40.433 | .040 | -40.444 | .040 | .03536 | .00233 |
| 25 Ω | .49242 | .00363 | -1.511 | .028 | -1.518 | .028 | .49152 | .00393 |

Tabelle 3-4 Phasenangaben für den **3,5-mm-Verifiziersatz** bei 20 GHz

| Verification Standard | S11 | | S21 | | S12 | | S22 | |
|--------------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | ANG /Deg | UNC +/- | ANG /Deg | UNC +/- | ANG /Deg | UNC +/- | ANG /Deg | UNC +/- |
| 50 Ω | -35.06 | 180.0 | -13.97 | .93 | -13.99 | .93 | -77.98 | 180.0 |
| 20 dB | 27.65 | 4.16 | -87.54 | .97 | -87.51 | .97 | -6.03 | 7.99 |
| 40 dB | 49.26 | 2.65 | -138.82 | 1.12 | -138.40 | 1.12 | 44.04 | 5.31 |
| 25 Ω | -86.61 | .62 | -12.33 | 1.03 | -12.40 | 1.03 | -116.06 | 1.97 |

4 Messunsicherheit bei Transmissionsmessungen

Messunsicherheit für angepasste Messobjekte

Im ersten Teil der Verifikationsauswertungen sollen die Messunsicherheiten bei Transmissionsmessungen für angepasste Messobjekte betrachtet werden. Die Messgenauigkeit ist im ZVK-Datenblatt (PD 757.5543.12) in Abhängigkeit von der Frequenz und der Dämpfung des Messobjektes spezifiziert. Zur Überprüfung dieser Angaben wurden nach durchgeführter Systemfehlerkalibrierung die Dämpfungen der drei angepassten Verifizierstandards (Dämpfungsglieder und 50- Ω -Luftleitung) mit Hilfe des Netzwerkanalysators ZVK gemessen. Zusätzlich wurden die beiden Dämpfungsglieder hintereinander geschaltet und als ein 70-dB-Standard vermessen (60 dB im Fall der 3,5-mm-Verifizierungen). Die jeweils vom ZVK ermittelten Dämpfungswerte wurden mit den Herstellerangaben verglichen und die Differenzen über der Frequenz grafisch aufgetragen.

Wie sich theoretisch zeigen lässt, ist die Vorwärts- und Rückwärtstransmission von reziproken Messobjekten, also beispielsweise einer Luftleitung oder eines Dämpfungsgliedes identisch ($S_{21} = S_{12}$). Ein guter Netzwerkanalysator - und dies bedeutet immer auch: ein gut *kalibrierter* Netzwerkanalysator - muss diese beiden Streuparameter daher möglichst genau gleich messen. Jede Abweichung zwischen den Messergebnissen für S_{21} und S_{12} deutet auf Unvollkommenheiten des Netzwerkanalysators oder seiner Kalibrierung hin. Für den Fall der weiter unten dargestellten Resultate (Bild 4-1 bis Bild 4-16) der Verifikationen mit dem ZVK betragen die maximalen Unterschiede zwischen den Vorwärts- und Rückwärtsmessungen nur einige Hundertstel Dezibel für den Betrag beziehungsweise wenige Zehntel Grad für die Phase. Die ist ein erstes wichtiges Indiz für die hohe Messgenauigkeit des ZVK.

Die Dämpfung der 50- Ω -Luftleitung beträgt einige Zehntel Dezibel und steigt mit der Frequenz leicht an. Aufgrund der Länge der Luftleitung von 75 mm bewirkt sie eine frequenzproportional linear ansteigende Phasenverschiebung, die in guter Näherung (Reflexionen vernachlässigt) wie folgt beschrieben werden kann: $\varphi = -360^\circ \cdot \tau \cdot f$, mit $\tau \approx 250$ ps bei einer Luftleitung von 75 mm Länge. Die Phase der Luftleitung fällt mit wachsender Frequenz und erreicht etwa -3.600° bei ihrer höchsten Betriebsfrequenz von $f = 40$ GHz .

Die Dämpfungsglieder weisen eine Dämpfung auf, die sehr genau (jedoch nicht exakt) mit ihren Nominalwerten übereinstimmt. Die elektrische Länge der beiden 2,92-mm-Standards bewirkt eine Laufzeit von etwa 90 ps und somit eine Phasenverschiebung von ungefähr -1.300° bei 40 GHz.

Die ermittelten Abweichungen für Transmissionsmessungen können den folgenden Diagrammen (Bild 4-1 bis Bild 4-16) entnommen werden. Die Dämpfungen der Verifikationsmessobjekte wurden sukzessive gesteigert. Begonnen wurde mit einer Dämpfung nahe 0 dB und schließlich als höchste Dämpfung 70 dB eingesetzt. Die ermittelten Differenzen zwischen den Verifikationsmessungen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für die Verifizierstandards sind als **blaue** (S_{21}) und **grüne** Kurven (S_{12}) dargestellt. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messergebnisse für die Verifizierstandards sind als blaue und grüne Toleranzbalken ergänzt. Die im Datenblatt für den ZVK spezifizierten Messunsicherheiten sind mit Hilfe von roten Kreuzen illustriert.

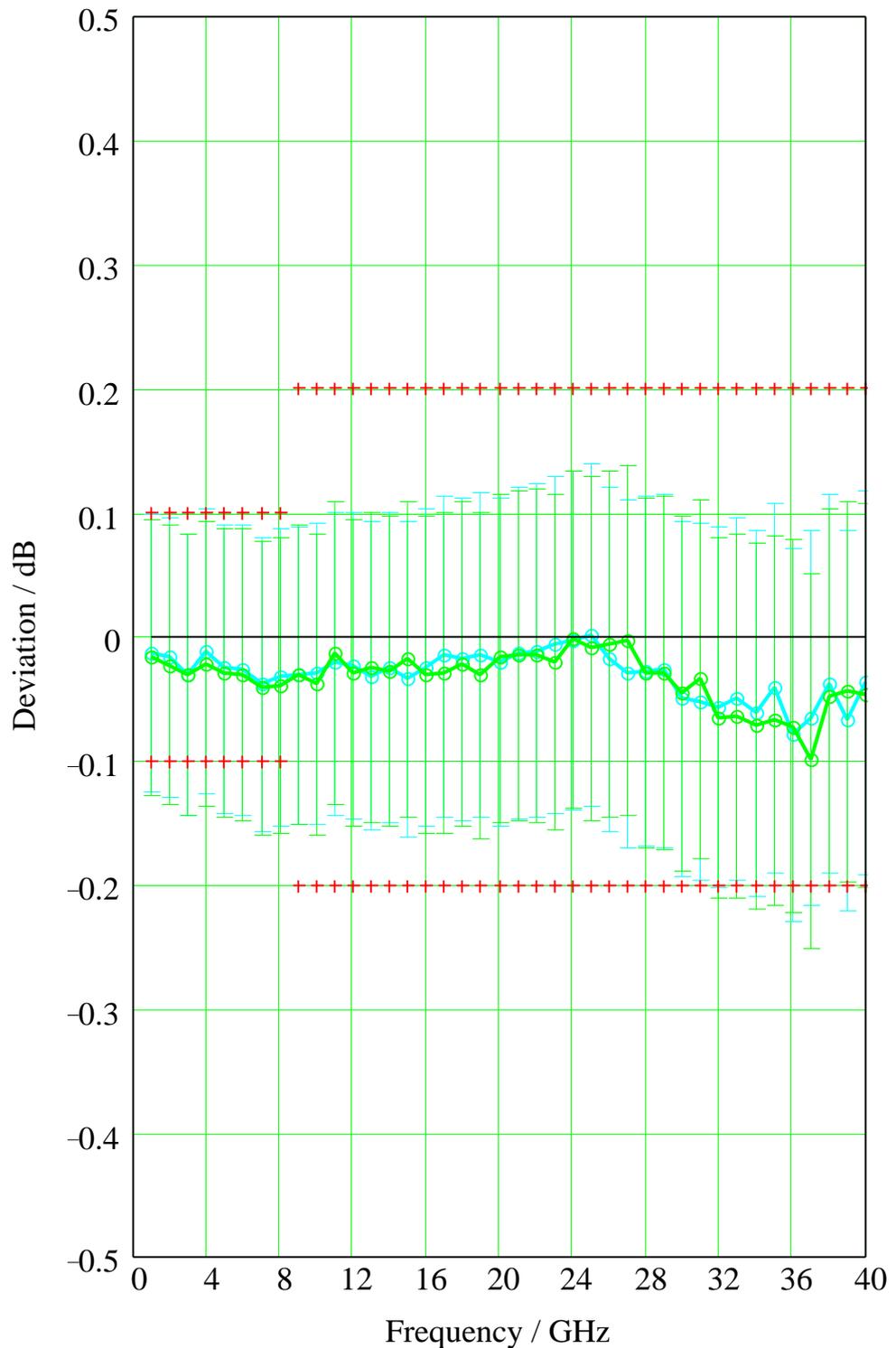


Bild 4-1 Transmissionsbetragsabweichungen nahe **0 dB** für die **2,92 mm** 50-Ω-Luftleitung

Dargestellt ist der Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

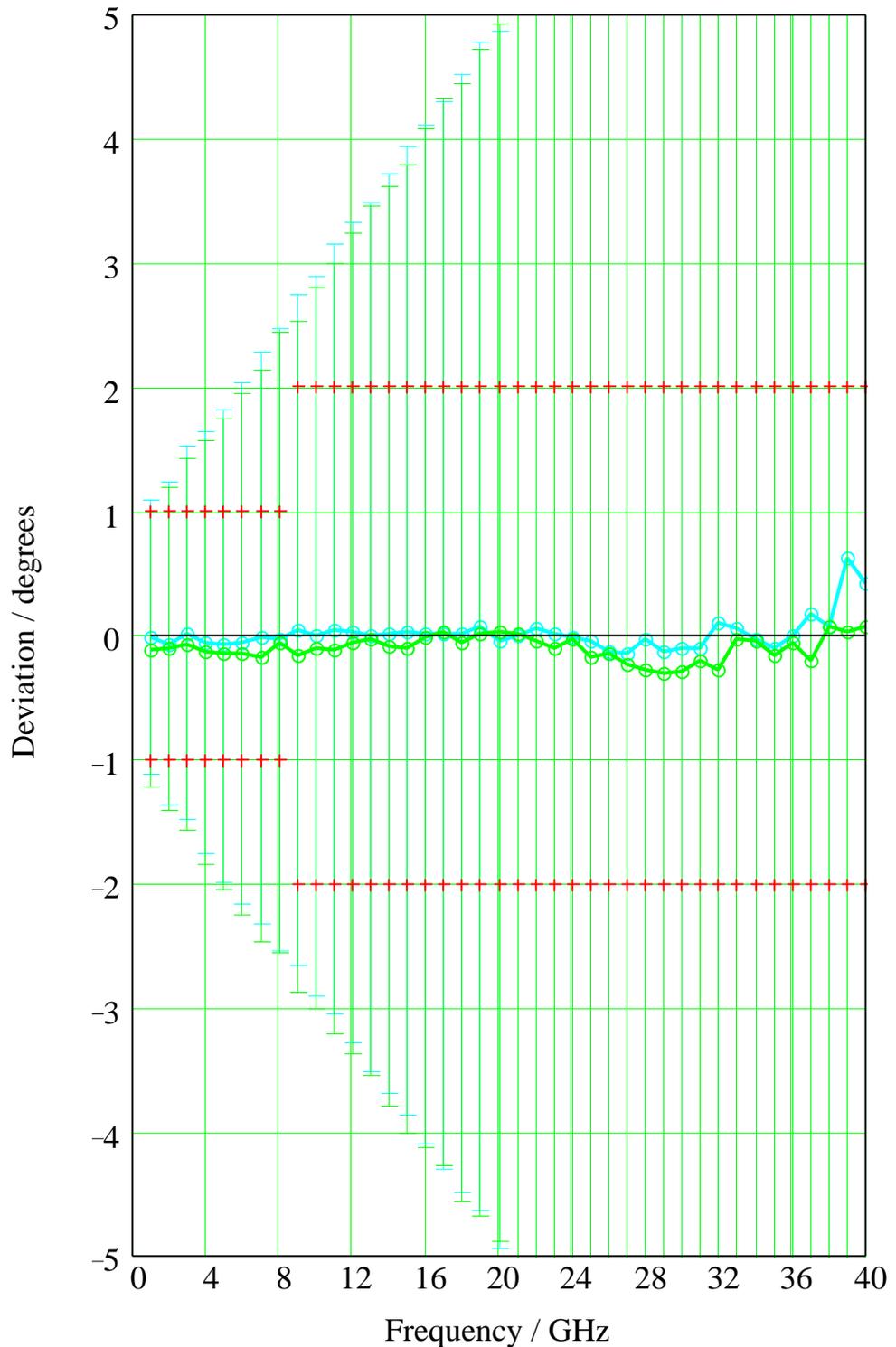


Bild 4-2 Transmissionsphasenabweichungen nahe **0 dB** für die **2,92 mm** 50- Ω -Luftleitung

Dargestellt ist der Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

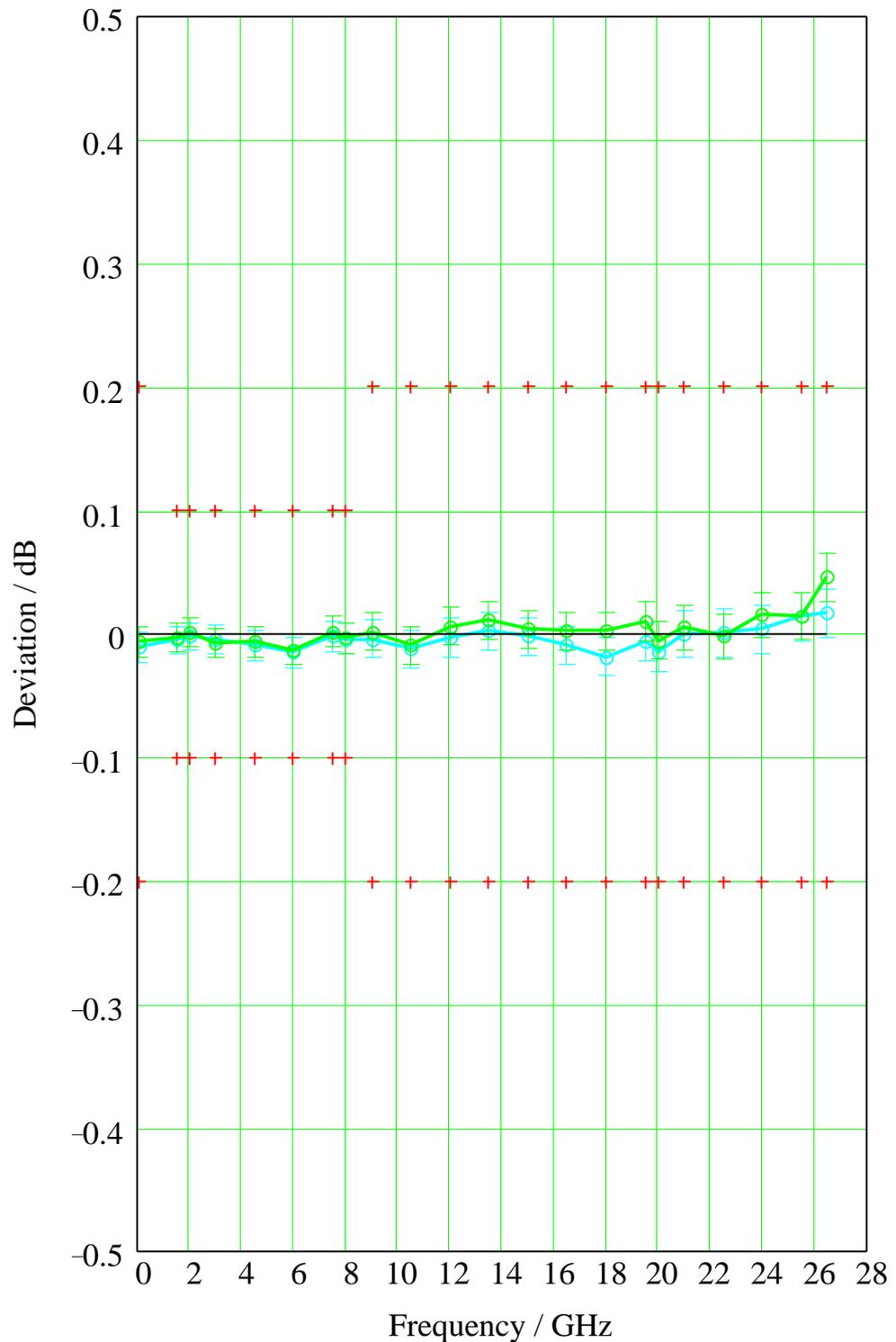


Bild 4-3 Transmissionsbetragsabweichungen nahe 0 dB für die 3,5 mm 50- Ω -Luftleitung

Dargestellt ist der Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

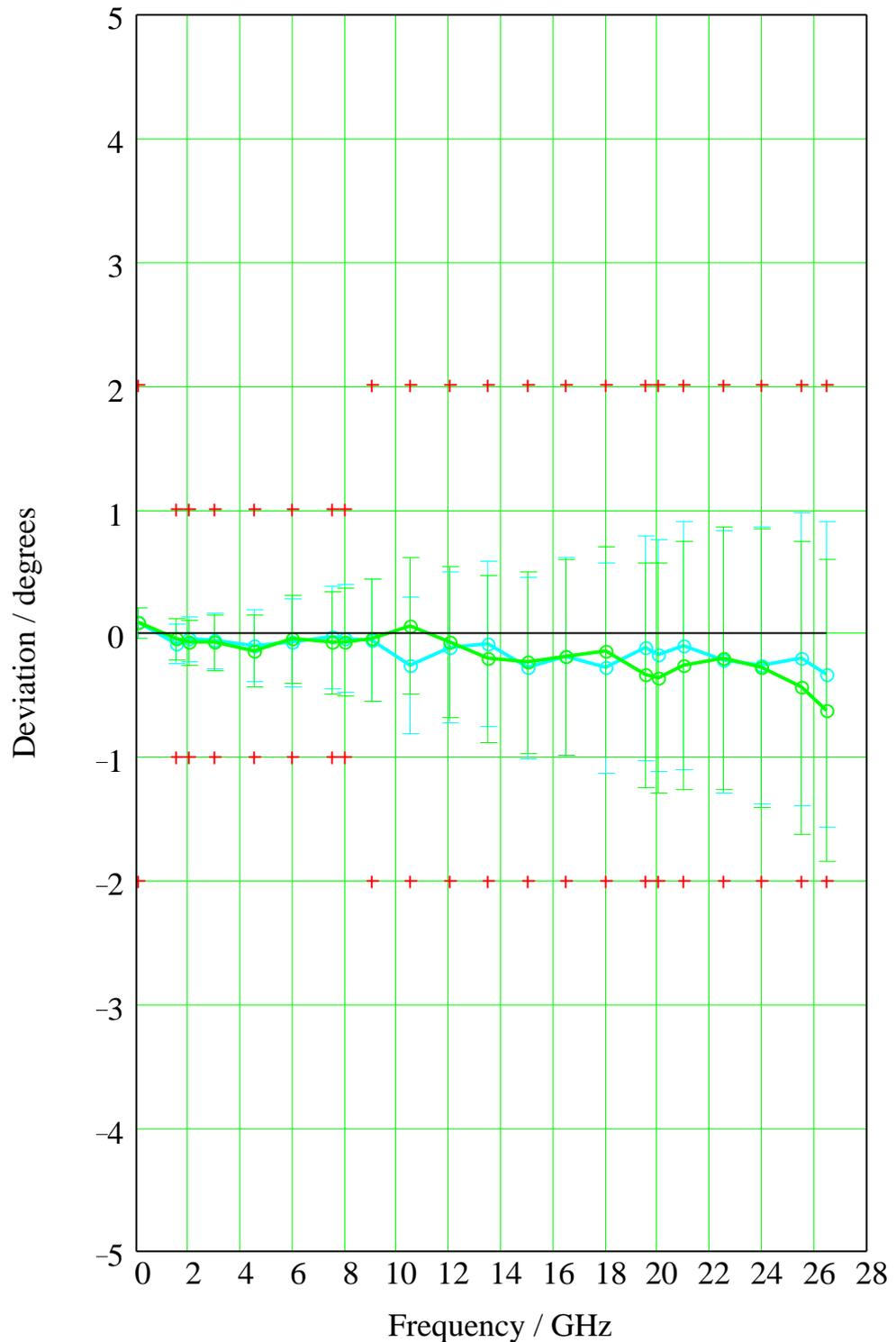


Bild 4-4 Transmissionsphasenabweichungen nahe 0 dB für die 3,5 mm 50-Ω-Luftleitung

Dargestellt ist der Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

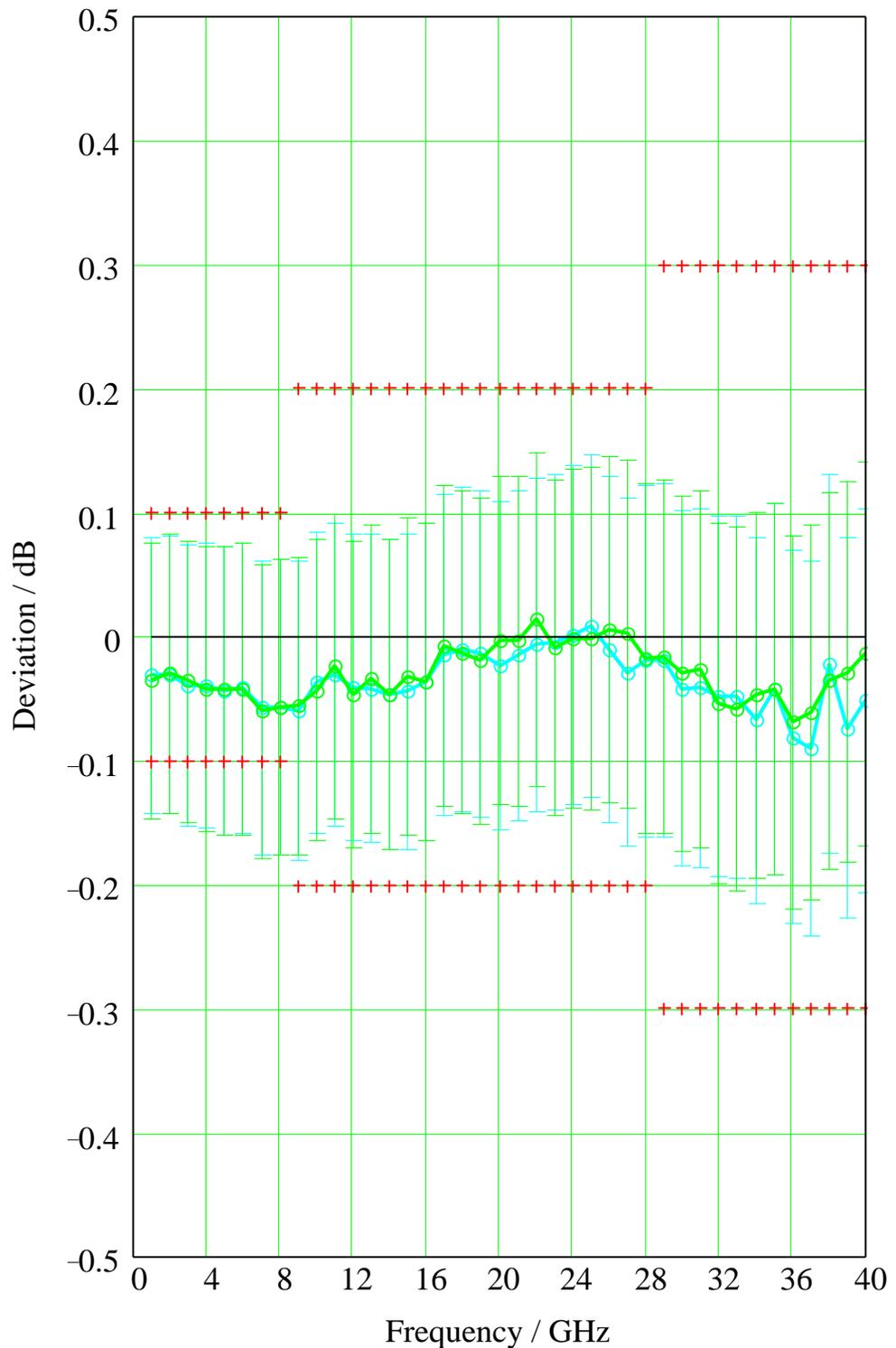


Bild 4-5 Transmissionsbetragsabweichungen nahe **20 dB** für den **2,92 mm** 20-dB-Standard

Dargestellt ist der Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

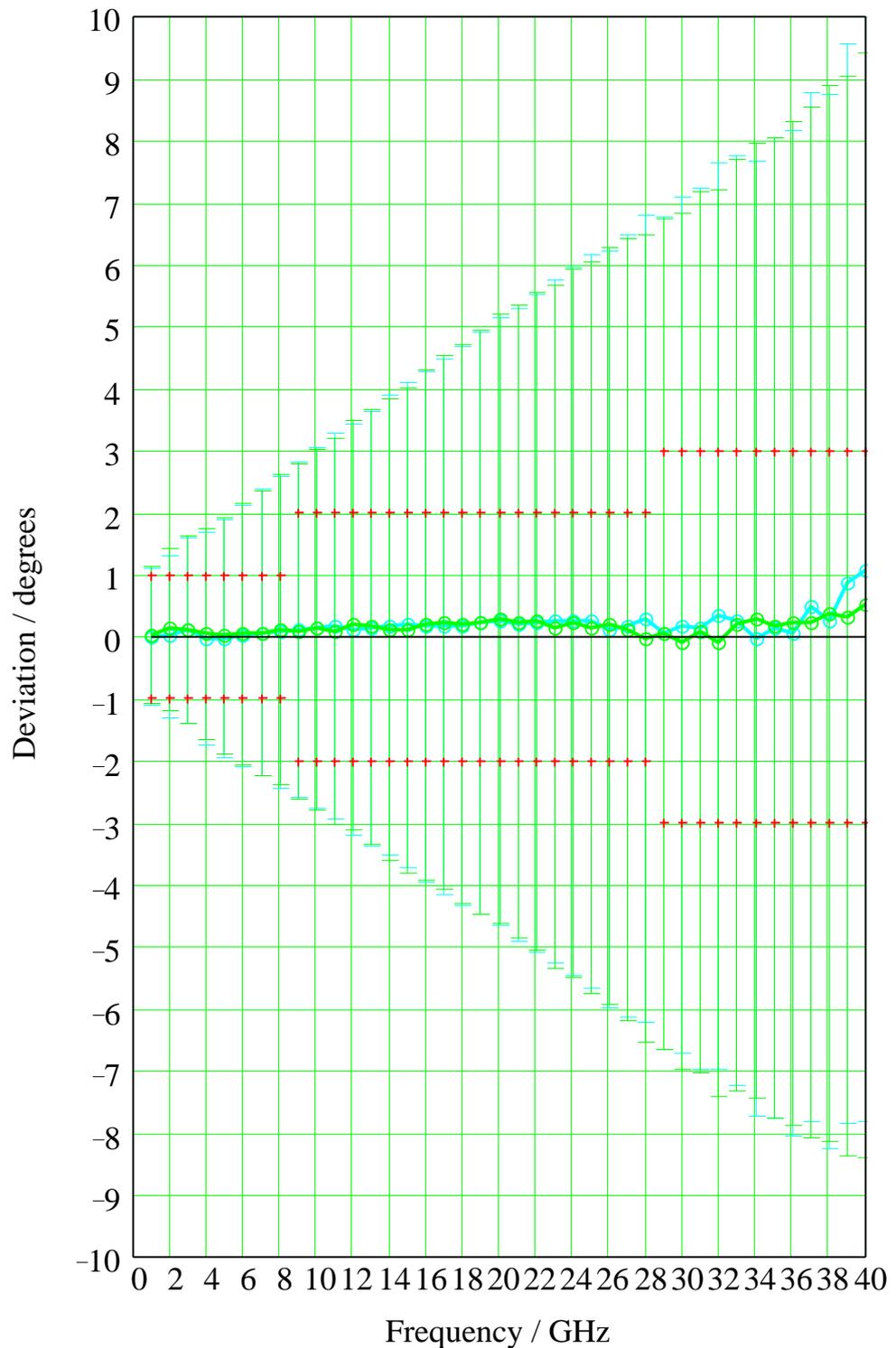


Bild 4-6 Transmissionsphasenabweichungen nahe **20 dB** für den **2,92 mm** 20-dB-Standard

Dargestellt ist der Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

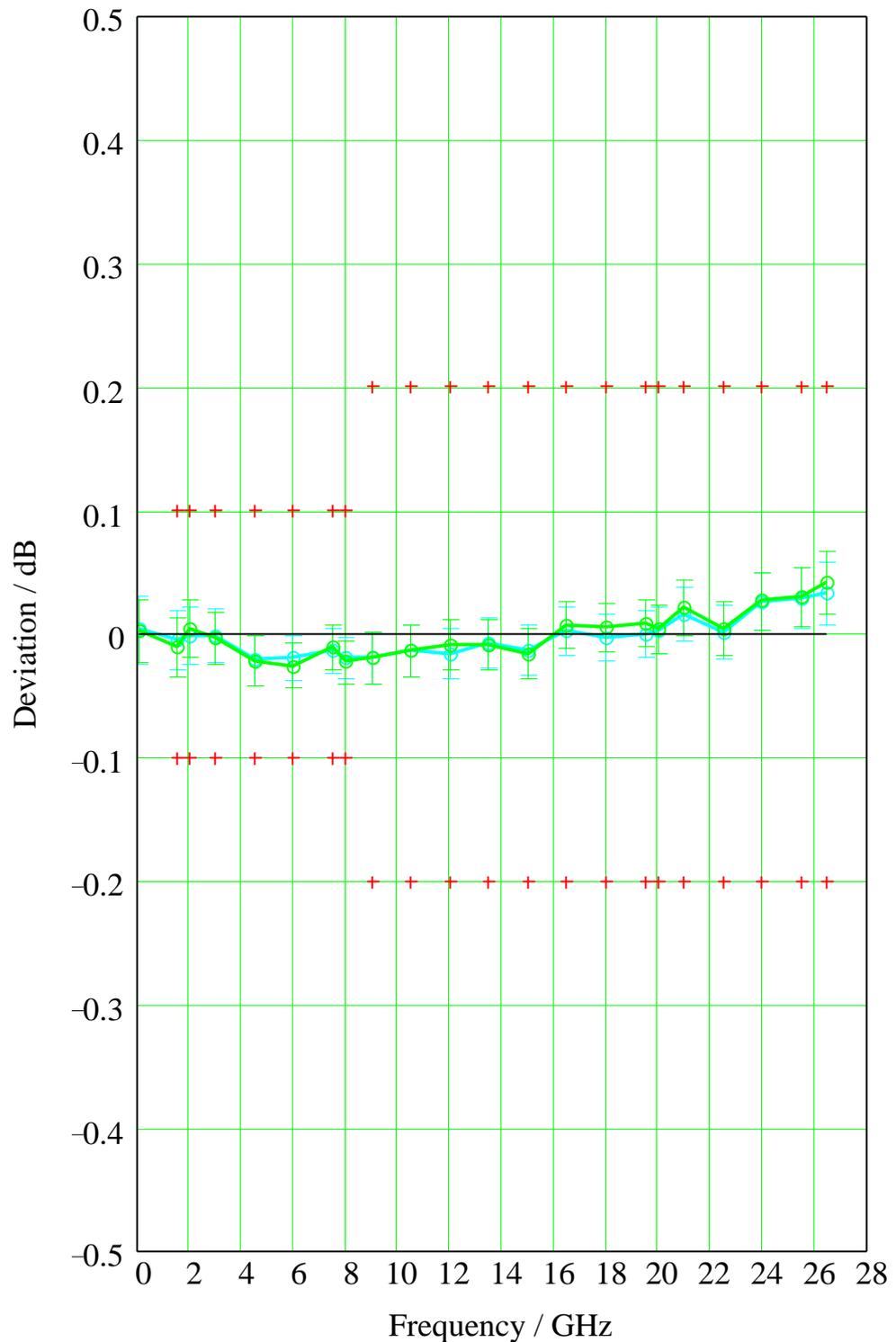


Bild 4-7 Transmissionsbetragsabweichungen nahe **20 dB** für den **3,5 mm 20-dB-Standard**

Dargestellt ist der Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

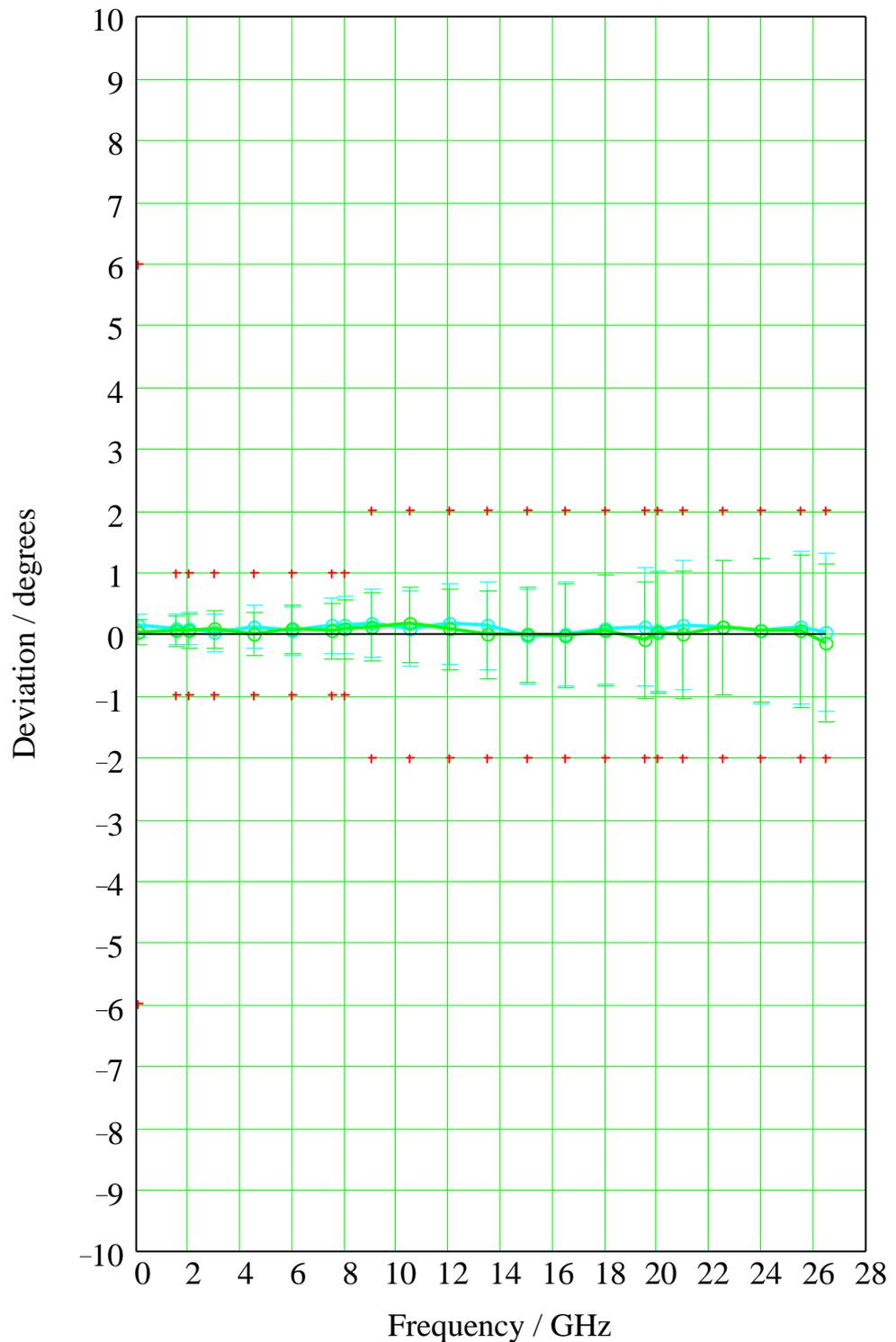


Bild 4-8 Transmissionsphasenabweichungen nahe **20 dB** für den **3,5 mm** 20-dB-Standard

Dargestellt ist der Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

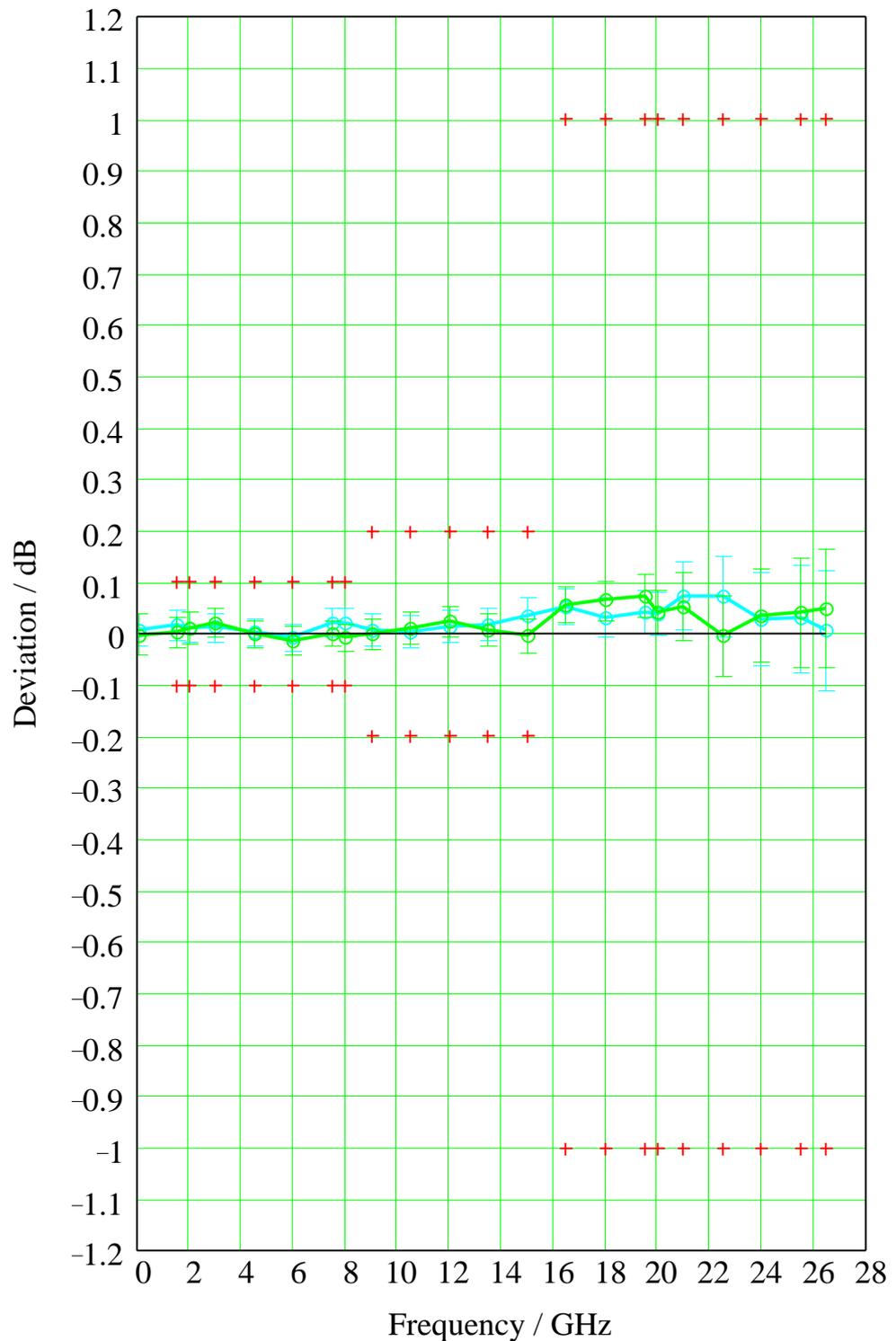


Bild 4-9 Transmissionsbetragsabweichungen nahe **40 dB** für den **3,5 mm 40-dB-Standard**

Dargestellt ist der Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

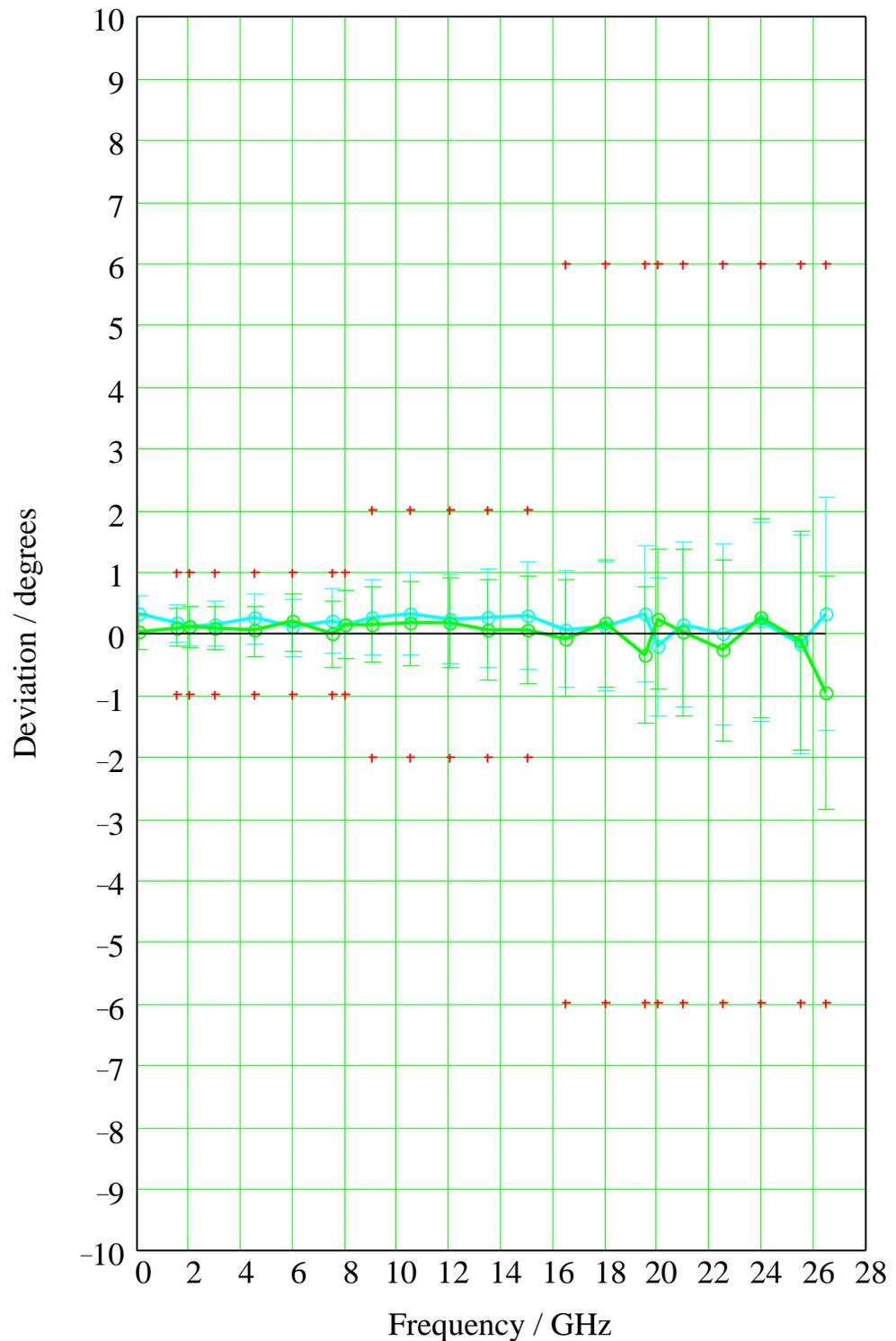


Bild 4-10 Transmissionsphasenabweichungen nahe **40 dB** für den **3,5 mm** 40-dB-Standard

Dargestellt ist der Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

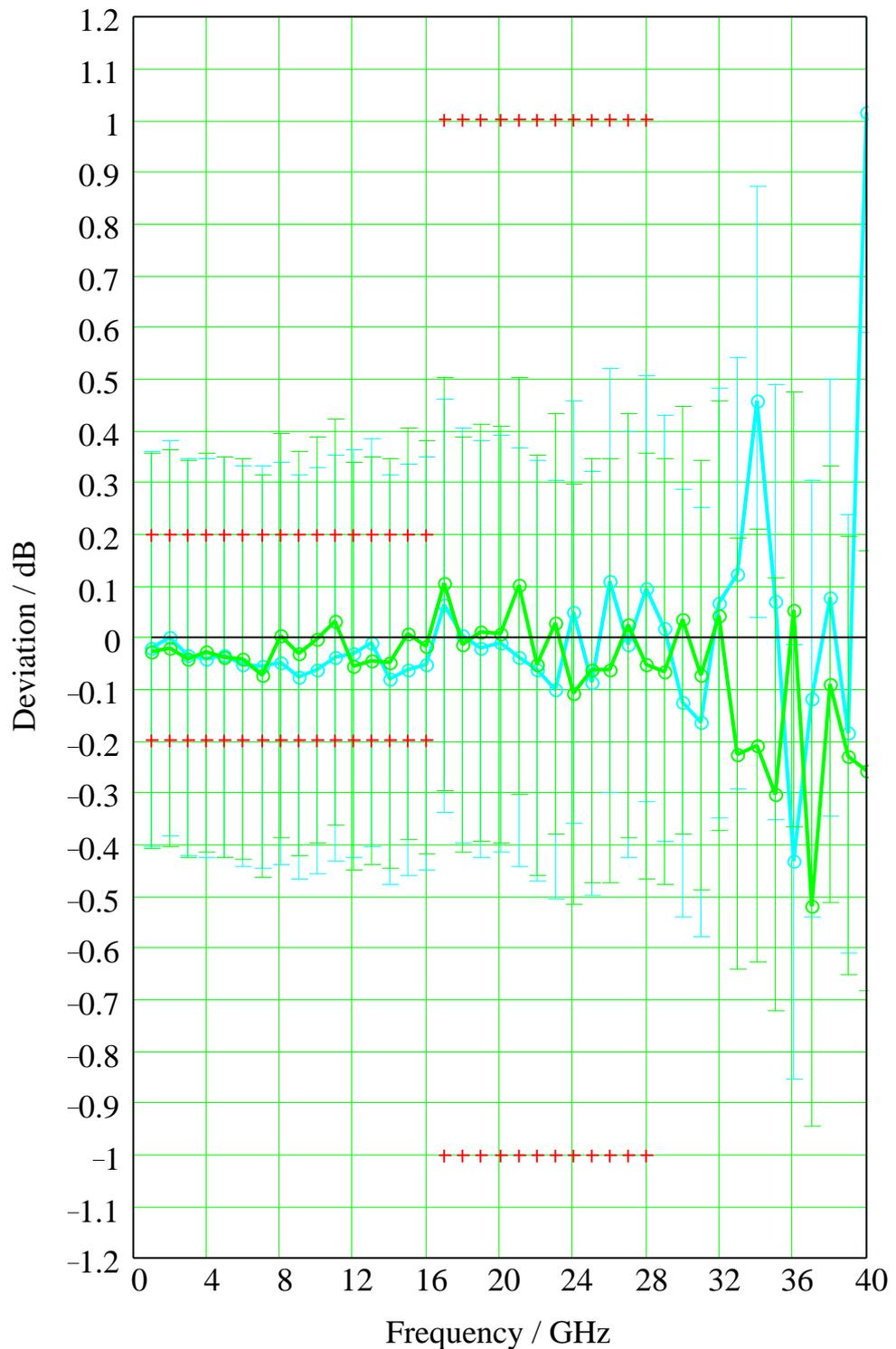


Bild 4-11 Transmissionsbetragsabweichungen nahe **50 dB** für den **2,92 mm** 50-dB-Standard

Dargestellt ist der Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

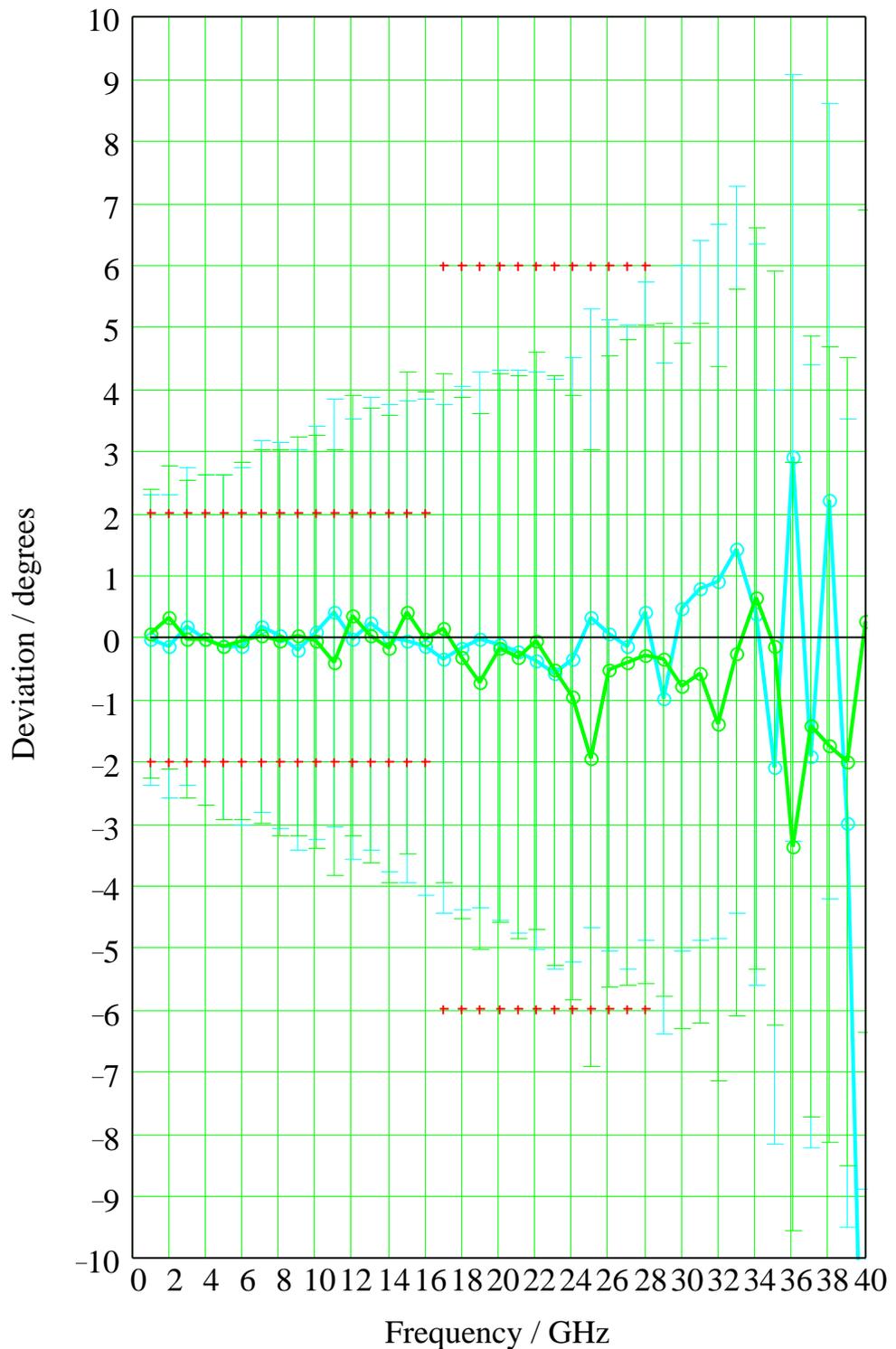


Bild 4-12 Transmissionsphasenabweichungen nahe **50 dB** für den **2,92 mm** 50-dB-Standard

Dargestellt ist der Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

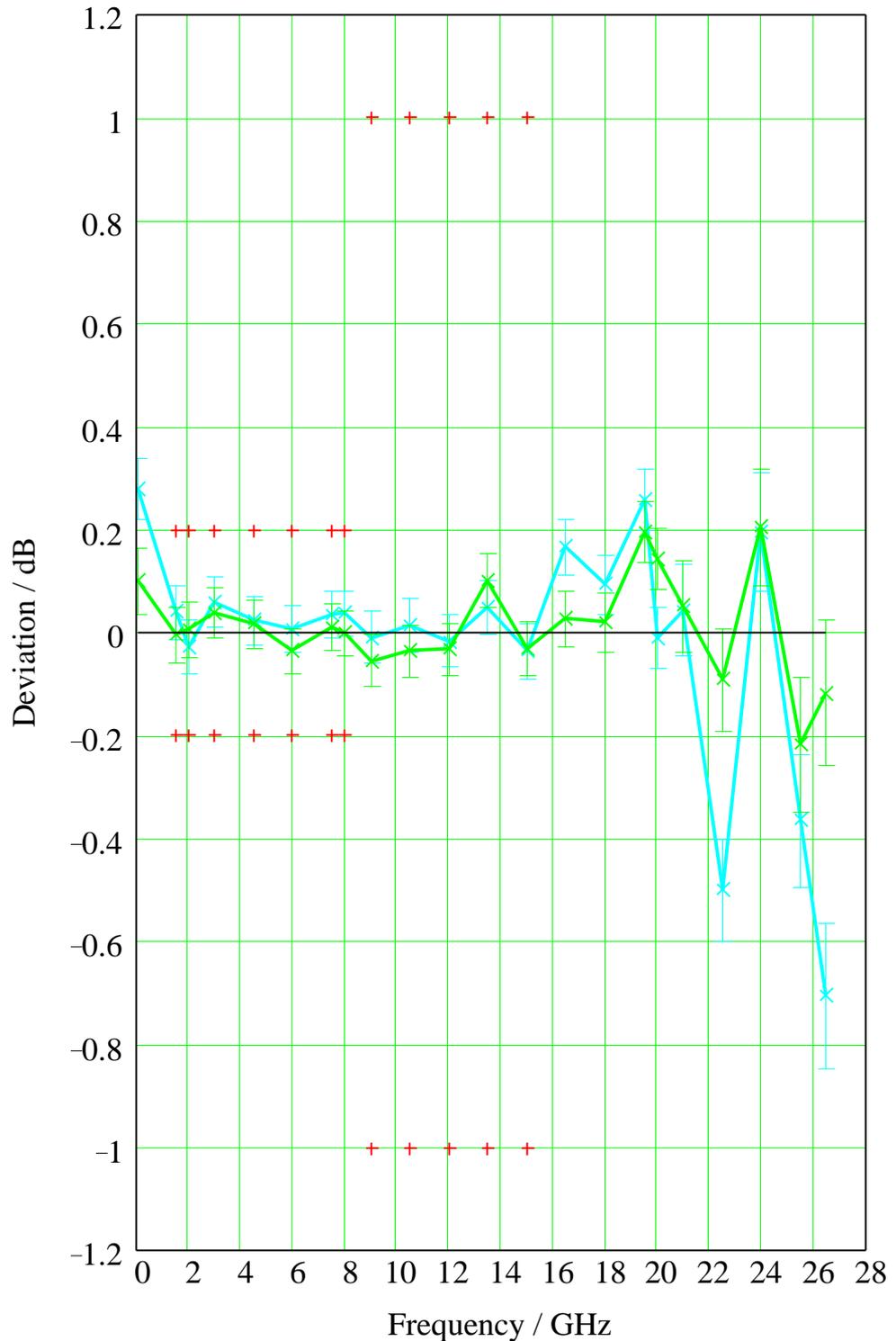


Bild 4-13 Transmissionsbetragsabweichungen nahe **60 dB** für die **3,5-mm**-Dämpfungsstandards

Dargestellt ist der Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und der Summe der Herstellerangaben für die beiden hintereinandergeschalteten Dämpfungsstandards (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die Summe der vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

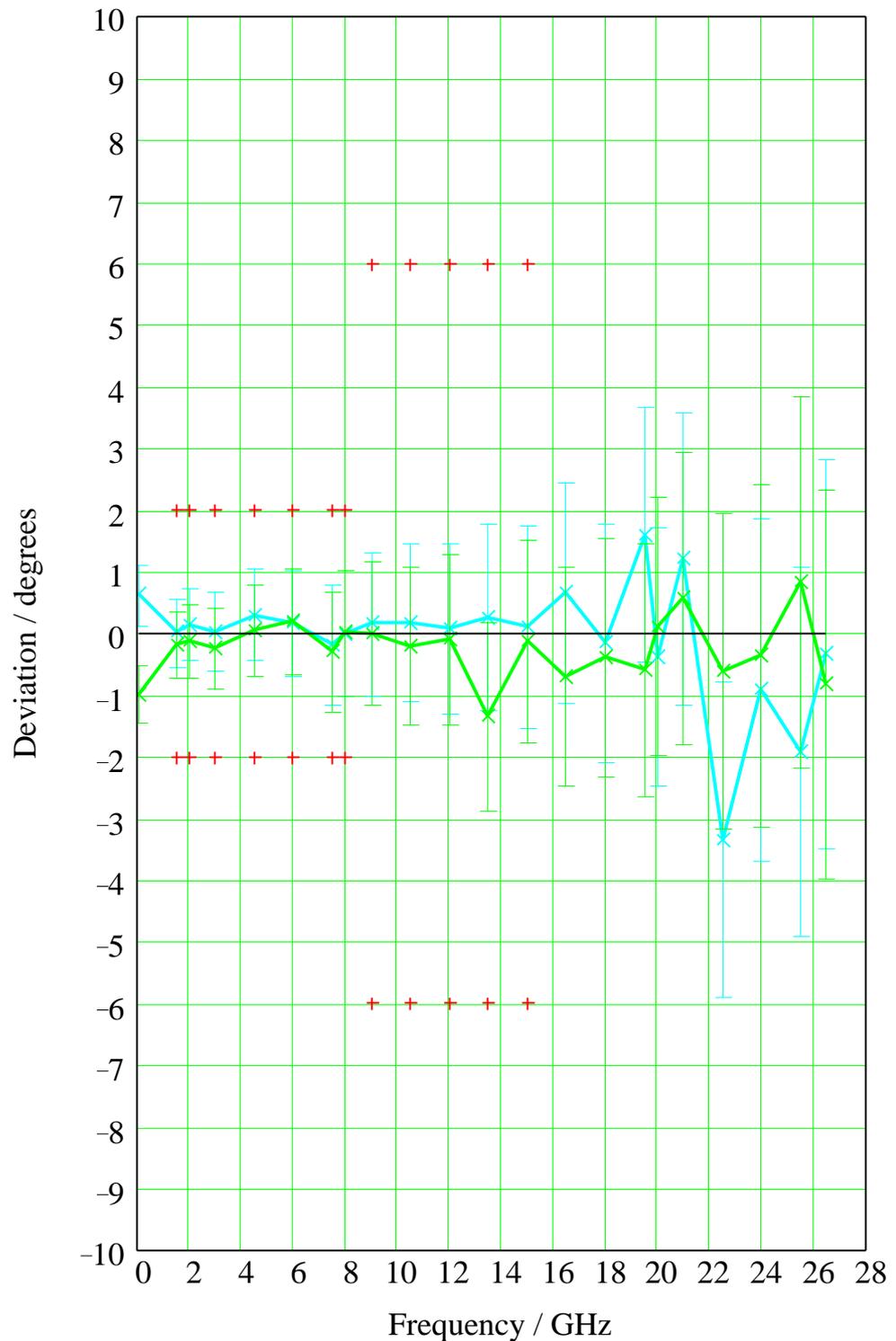


Bild 4-14 Transmissionsphasenabweichungen nahe **60 dB** für die **3,5-mm**-Dämpfungsstandards

Dargestellt ist der Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und der Summe der Herstellerangaben für die beiden hintereinandergeschalteten Dämpfungsstandards (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die Summe der vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

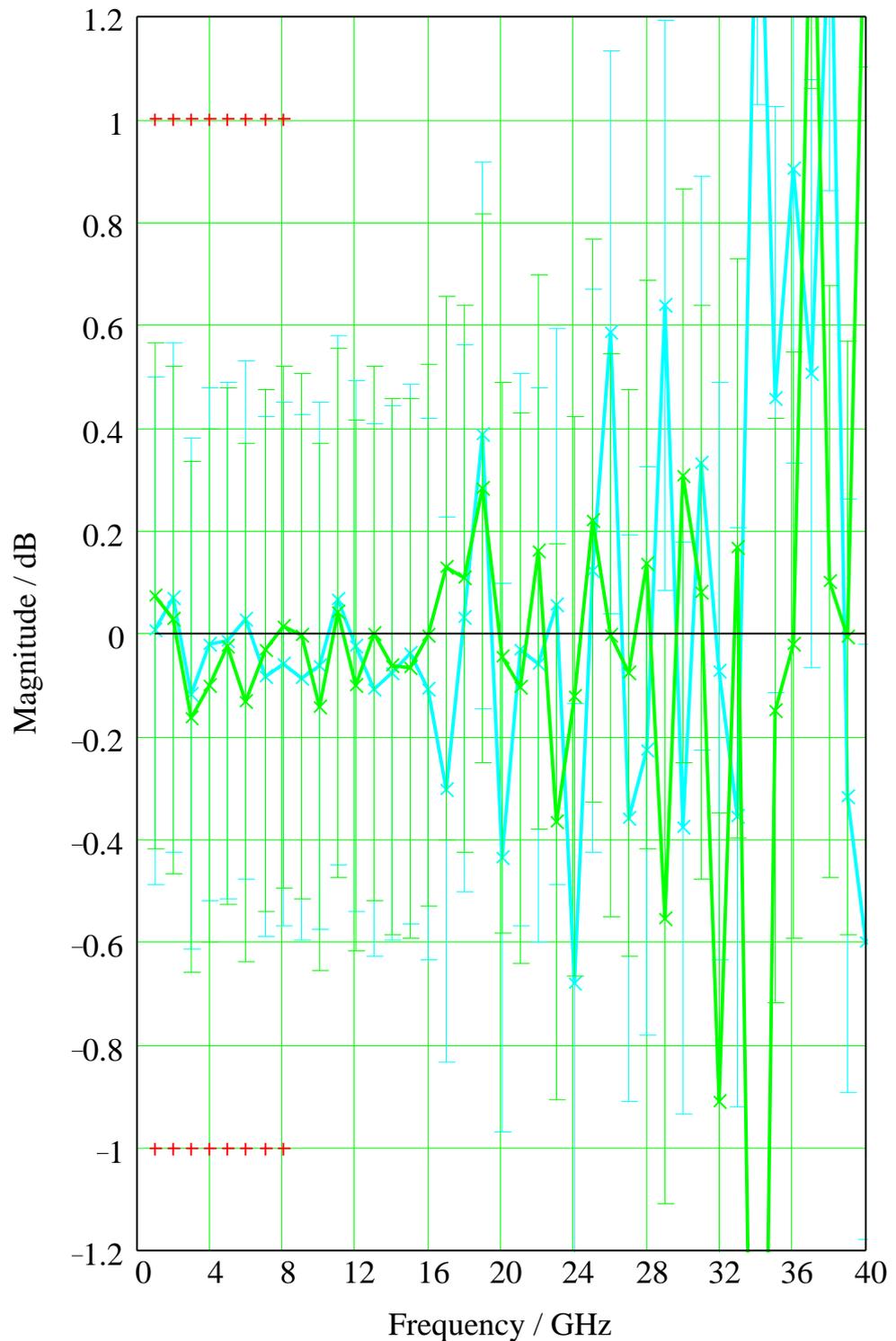


Bild 4-15 Transmissionsbetragsabweichungen nahe 70 dB für die 2,92-mm-Dämpfungsstandards

Dargestellt ist der Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und der Summe der Herstellerangaben für die beiden hintereinandergeschalteten Dämpfungsstandards (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die Summe der vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

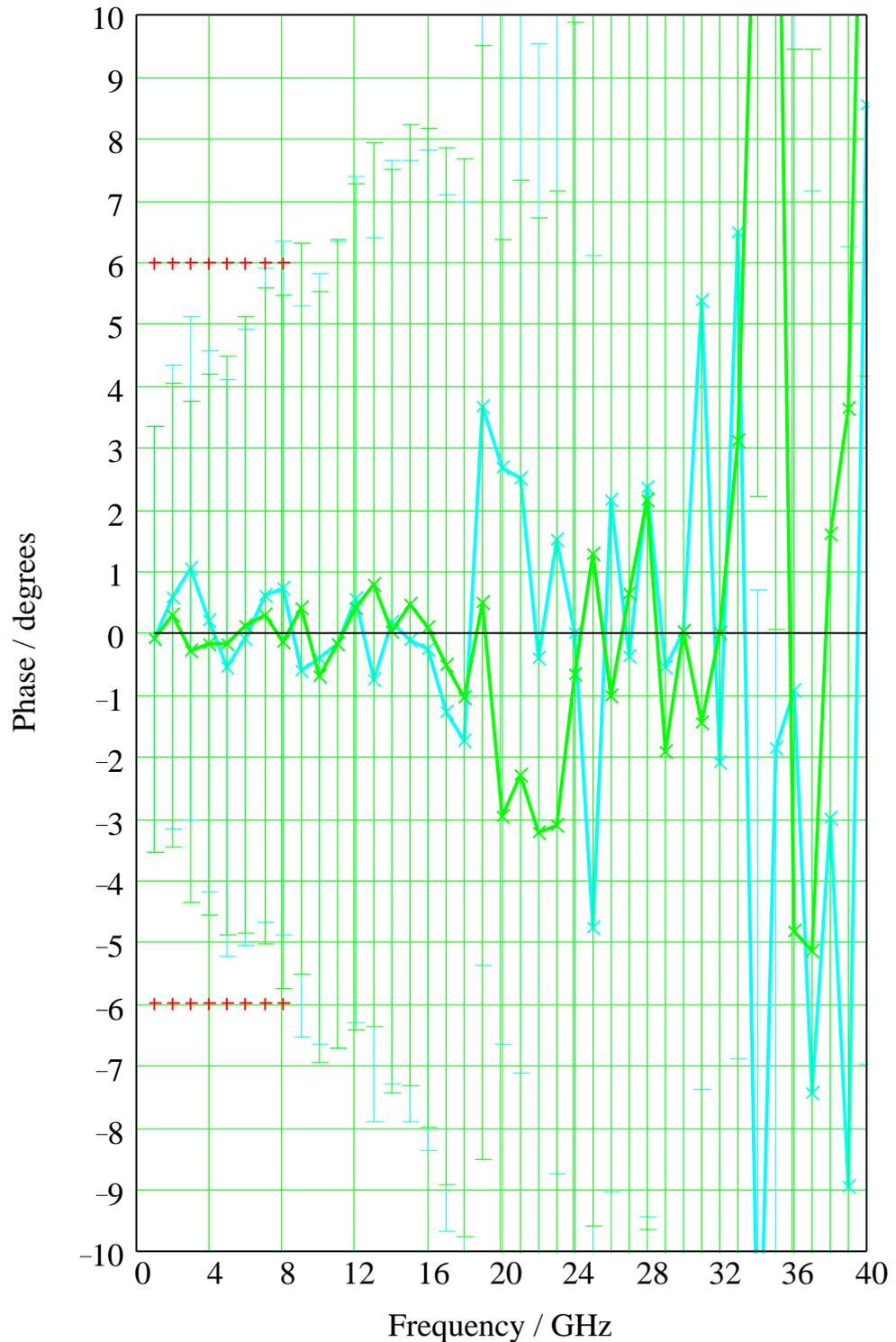


Bild 4-16 Transmissionsphasenabweichungen nahe **70 dB** für die **2,92-mm**-Dämpfungsstandards

Dargestellt ist der Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und der Summe der Herstellerangaben für die beiden hintereinandergeschalteten Dämpfungsstandards (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die Summe der vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten seiner Messungen sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

Messunsicherheit für fehlangepasste Messobjekte

Im ZVK-Datenblatt ist die Messunsicherheit bei Transmissionsmessungen nur für angepasste Messobjekte spezifiziert. Wegen ihrer praktischen Bedeutung sollte jedoch die Transmissionsmessgenauigkeit auch für fehlangepasste Messobjekte geprüft werden. Hierzu wurde die gestufte Luftleitung (Bild 4-17) als Verifizierstandard benutzt.

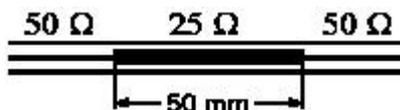


Bild 4-17 Gestufte Luftleitung (Beatty-Standard)

Der Standard weist eine Verdickung des coaxialen Innenleiters auf, die einen Impedanzsprung von 50Ω auf 25Ω und wieder zurück bewirkt. Bei den ungeradzahigen Vielfachen der Frequenz f_0 , mit $f_0 = c / (4 \cdot L)$, ergibt sich eine Lambda-Viertel-Transformation ($L =$ Länge der $25\text{-}\Omega$ -Sektion und $c =$ Lichtgeschwindigkeit). Unter Vernachlässigung von Leitungsverlusten ergibt sich dann für die Eingangsimpedanz ein Wert von $12,5 \Omega$. Dies entspricht einem Reflexionsfaktor von $|r| = 60\%$ beziehungsweise etwa $-4,44 \text{ dB}$. Der Transmissionsfaktor ist dann folglich kleiner als 0 dB (unter der Annahme der Verlustfreiheit etwa $-1,94 \text{ dB}$). Bei allen ganzzahligen Vielfachen der Frequenz $2 \cdot f_0 \approx 3 \text{ GHz}$ liegt eine Lambda-Halbe-Transformation vor. Der Standard ist gut angepasst und sein Transmissionsfaktor beträgt - von Leitungsverlusten abgesehen - dann 0 dB . In der Realität bewirken die Verluste eine Dämpfung von einigen Zehntel Dezibel. Das Bild 4-18 zeigt hierzu die Ergebnisse einer Simulationsrechnung.

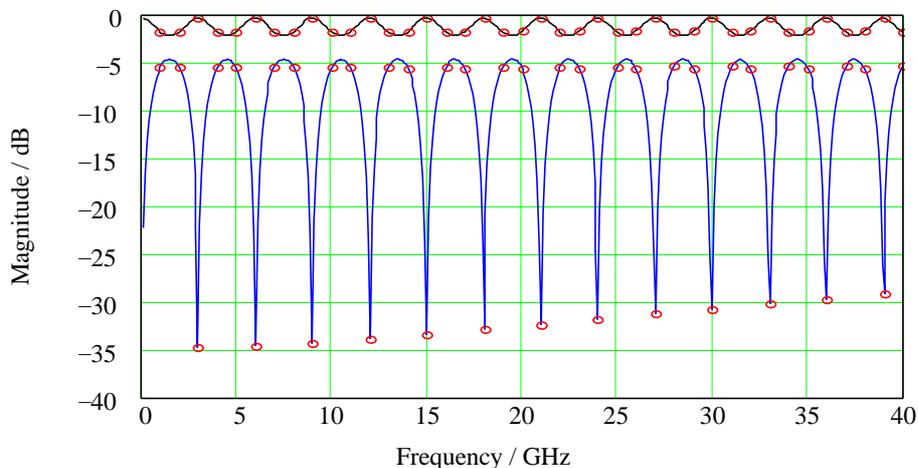


Bild 4-18 Simulationsergebnisse für eine gestufte Luftleitung
Transmission (oben) und Reflexion (unten).
Die roten Punkte kennzeichnen Vielfache von 1 GHz.

Die Bilder 4-19 bis 4-22 zeigen die Transmissionsmessergebnisse des ZVK mit gestuften Luftleitungen. Die Messgenauigkeit für fehlangepasste Messobjekte ist im ZVK-Datenblatt zwar nicht spezifiziert; dennoch zeigen die durchgeführten Verifizierungen, dass auch für den Fall der fehlangepassten $25\text{-}\Omega$ -Luftleitungen die beobachteten Messabweichungen geringer sind als die für angepasste Messobjekte im Datenblatt angegebenen Spezifikationen. Dies gilt sogar bei den ungeraden Vielfachen der Frequenz $f_0 \approx 1,5 \text{ GHz}$, für die der Reflexionsfaktor des Standards mit 60% relativ hoch ist und einer Reflexionsdämpfung von nur etwa $4,4 \text{ dB}$ entspricht.

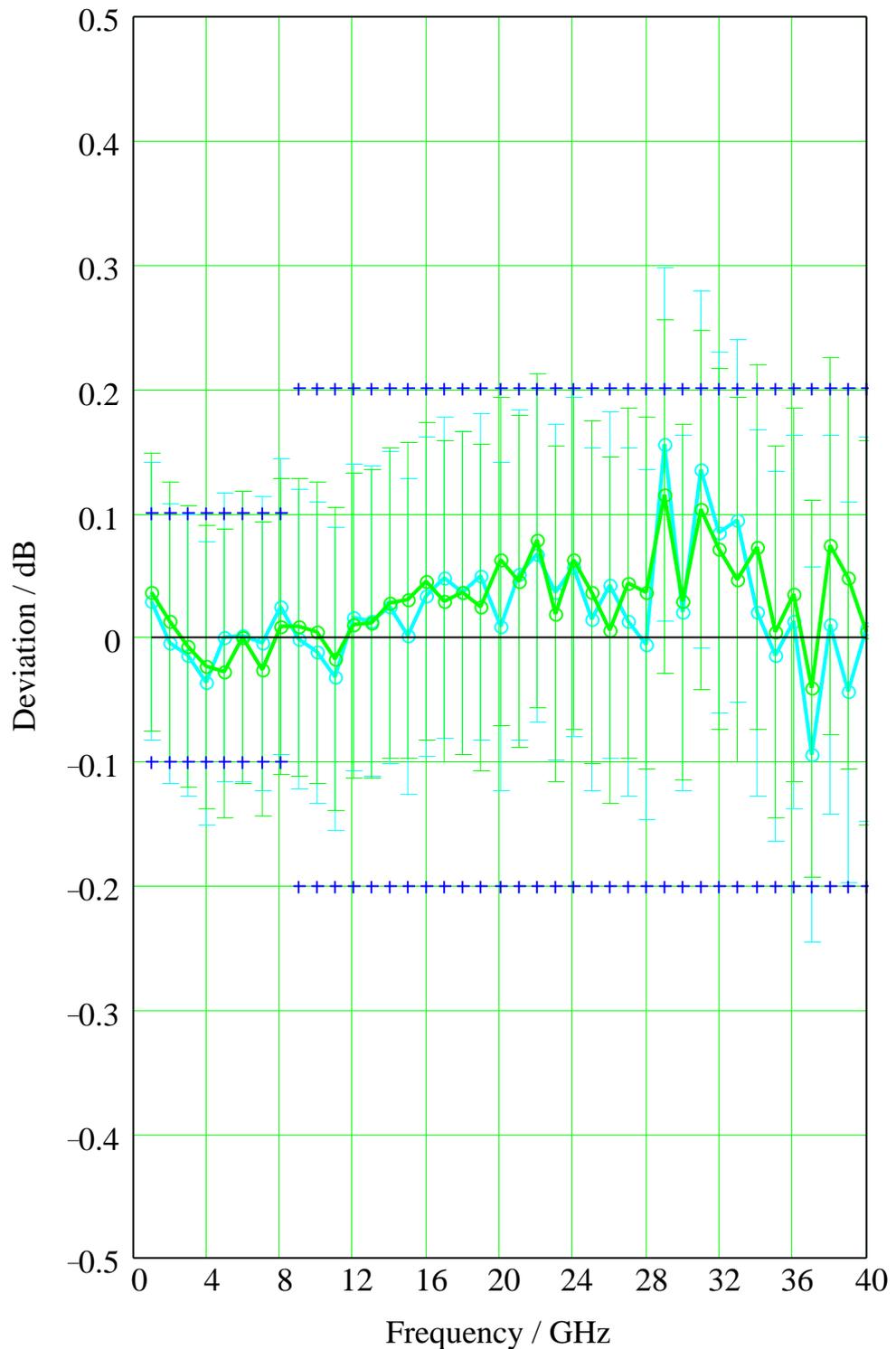


Bild 4-19 Transmissionsbetragsabweichungen nahe **0 dB** für die **2,92 mm 25-Ω**-Luftleitung

Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeit für fehlangepasste Messobjekte ist im ZVK-Datenblatt **nicht spezifiziert**. Zur Information sind die Spezifikationen für angepasste Messobjekte als blaue Kreuze angegeben.

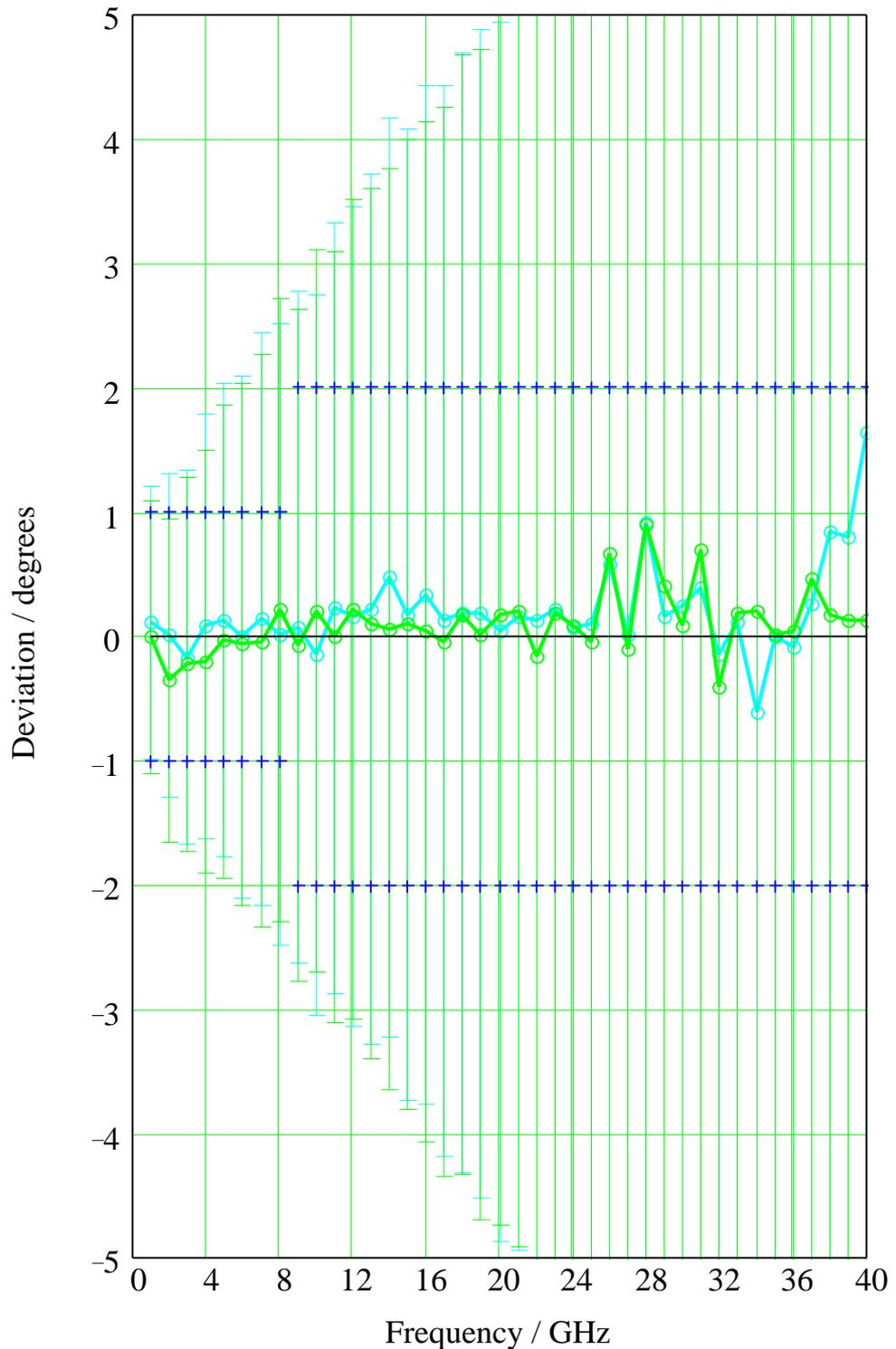


Bild 4-20 Transmissionsphasenabweichungen nahe 0 dB für die 2,92 mm 25- Ω -Luftleitung

Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeit für fehlangepasste Messobjekte ist im ZVK-Datenblatt **nicht spezifiziert**. Zur Information sind die Spezifikationen für angepasste Messobjekte als blaue Kreuze angegeben.

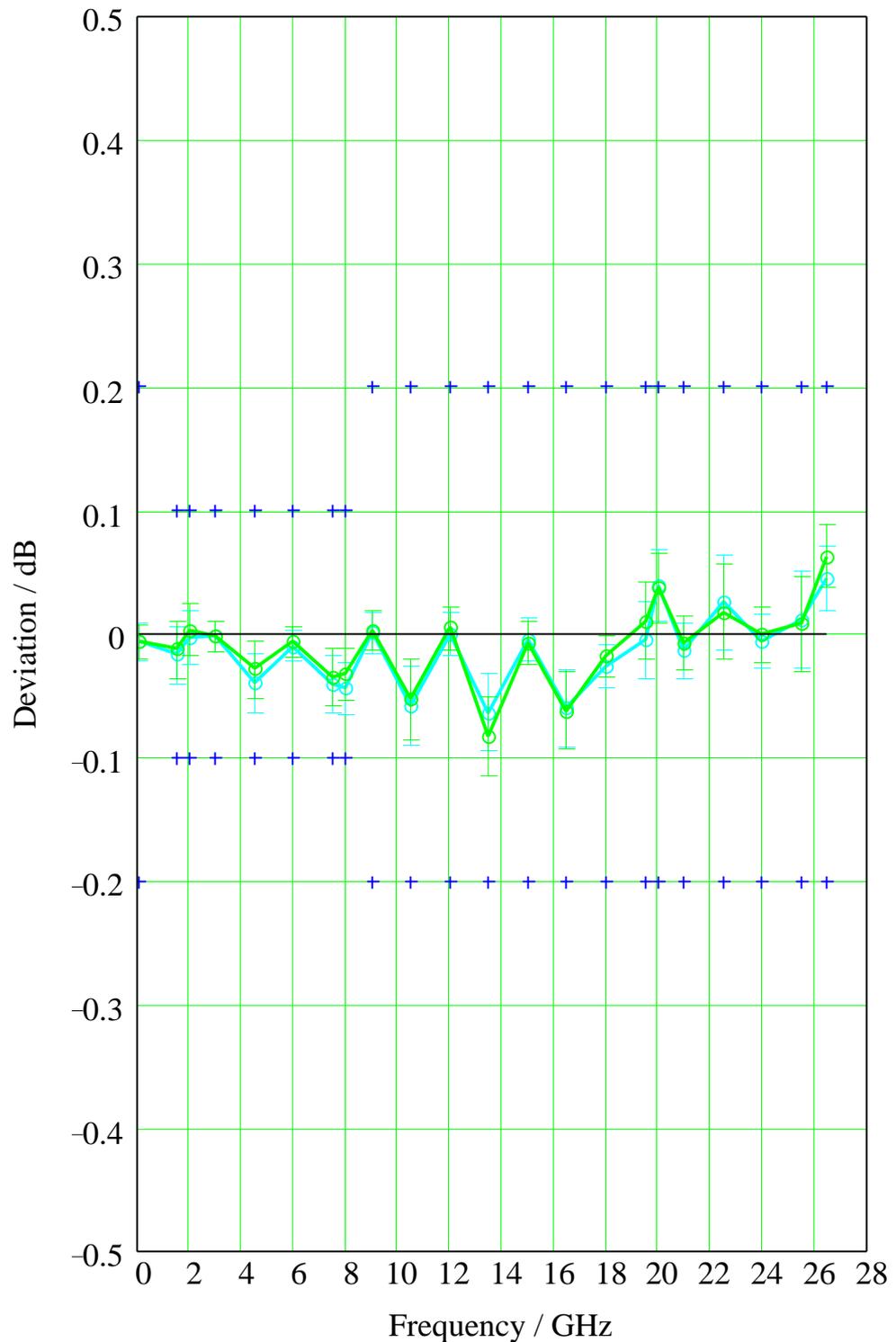


Bild 4-21 Transmissionsbetragsabweichungen nahe **0 dB** für die **3,5 mm 25-Ω**-Luftleitung

Unterschied der **Beträge** zwischen den Verifizierungsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeit für fehlangepasste Messobjekte ist im ZVK-Datenblatt **nicht spezifiziert**. Zur Information sind die Spezifikationen für angepasste Messobjekte als blaue Kreuze angegeben.

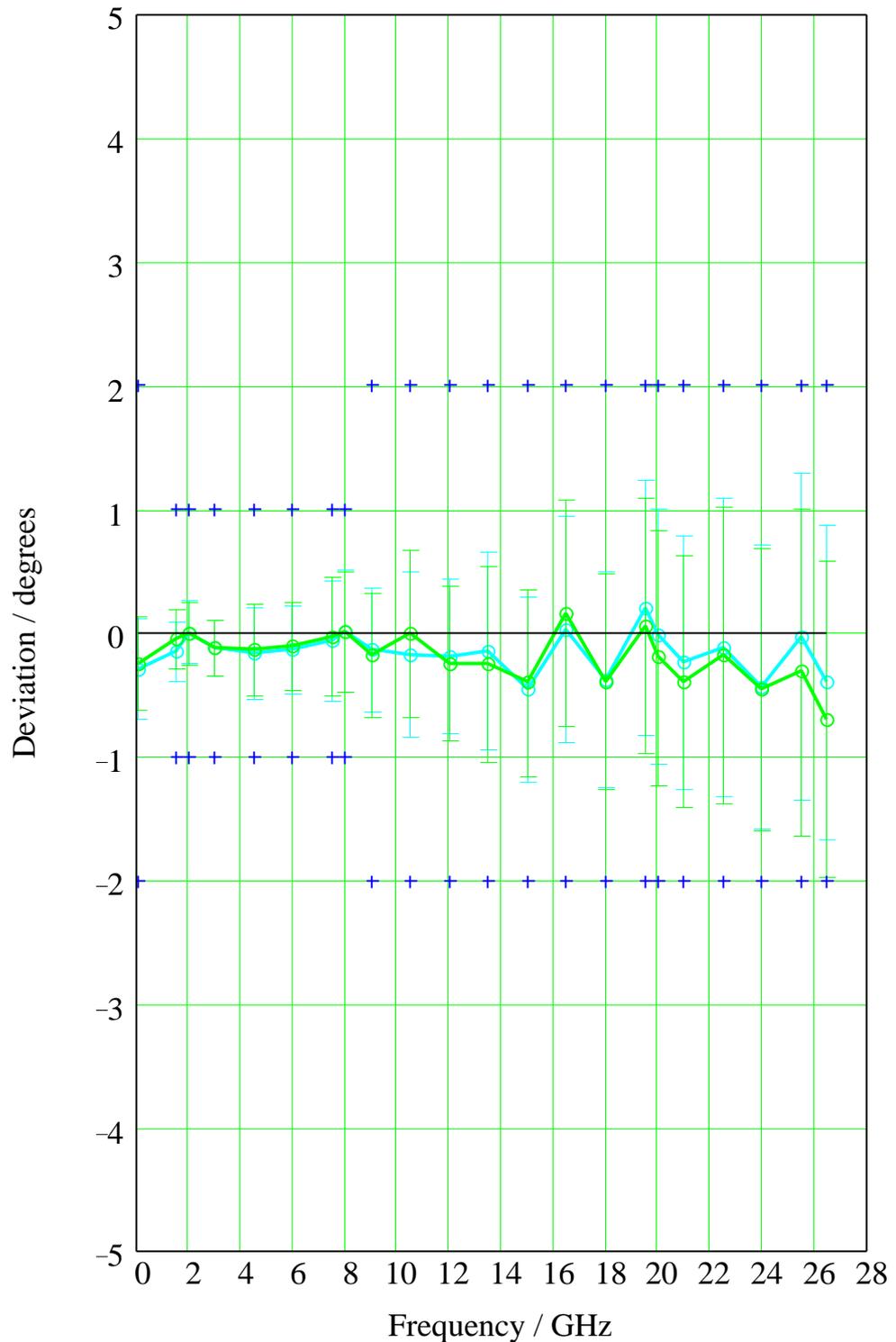


Bild 4-22 Transmissionsphasenabweichungen nahe 0 dB für die 3,5 mm 25-Ω-Luftleitung

Unterschied der **Phasen** zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Verifizierstandard (blaue Kurve: S_{21} , grüne Kurve: S_{12}) im Frequenzbereich 45 MHz bis 26,5 GHz. Die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten sind als blaue und grüne Toleranzbalken illustriert. Die Messgenauigkeit für fehlangepasste Messobjekte ist im ZVK-Datenblatt **nicht spezifiziert**. Zur Information sind die Spezifikationen für angepasste Messobjekte als blaue Kreuze angegeben.

5 Messunsicherheit bei Reflexionsmessungen

Der zweite Teil dieser Verifikationsauswertungen befasst sich mit der Messgenauigkeit für Reflexionsmessungen (vgl. ZVK-Datenblatt PD 757.5543.12). Leider sind Reflexionsstandards mit abgestuften und präzise bekannten Reflexionsfaktoren nicht verfügbar. Sie wären für diese Art von Verifikationen besonders gut geeignet.

Eine wichtige Ausnahme ist der Kurzschluss-Standard (SHORT). Er stellt eine wohldefinierte Reflexion dar, deren Betrag frequenzunabhängig und in guter Näherung zu 0 dB angenommen werden kann. Es wird dabei vorausgesetzt, dass seine elektrische Länge möglichst klein und folglich auch seine Verluste gering sind. Unter Berücksichtigung der durch seine elektrische Länge hervorgerufenen Phasenverschiebung kann der (komplexe) Reflexionsfaktor des Standards mit guter Genauigkeit zu $r = -1$ angenommen werden. Ein präziser Kurzschluss-Standard ist somit nahezu ideal für die Verifikation der Messgenauigkeit für hohe Reflexionsfaktoren geeignet.

Dies gilt jedoch nur dann, wenn der Kurzschluss nicht bereits als Kalibrierstandard im Rahmen einer TOSM-Kalibrierung verwendet wurde. Dann würde die Wiederverwendung dieses Standards zum Zwecke der Verifikation nämlich nur ein Maß für die Wiederholbarkeit der Messungen und die Stabilität des Netzwerkanalysesystems erbringen. Dies wäre keine Verifikation im eigentlichen Sinne, also eine Überprüfung der Messgenauigkeit, sondern nur ein Test der Wiedererkennung des Standards durch den Analysator.

Wie bereits im Kapitel 2 (auf Seite 3) erwähnt, wurde als Kalibriermethode das (von R&S patentierte) TOM-Verfahren verwendet. Dabei handelt es sich um eine der sogenannten modernen Kalibriermethoden, zu denen auch die Verfahren TRM, TNA (ebenfalls R&S-Patente) und TRL gehören, die alle für den Netzwerkanalysator ZVK zur Verfügung stehen. Voraussetzung für diese Verfahren ist stets ein Zweiter-Netzwerkanalysator mit vier Empfangskanälen (zwei Messkanäle und zwei Referenzkanäle) wie ZVR, ZVC, ZVM oder ZVK. Netzwerkanalysatoren, die nur drei Empfangskanäle aufweisen (z. B. ZVRE), sind prinzipiell für diese modernen Kalibriermethoden nicht geeignet.

Ein Vorteil der TOM-Methode ist, dass ein Kurzschlussstandard (SHORT) für die Kalibrierung überhaupt nicht benötigt wird. Er steht somit nach der Kalibrierung als vollwertiger *Verifizier*-Standard zur Verfügung. Es genügt dann, einfach Kurzschlussstandards an die beiden kalibrierten Referenzebenen der Messtore (PORT 1 und PORT 2) anzuschließen, um unmittelbar eine Verifizierung der Reflexionsmessgenauigkeit des Netzwerkanalysators für den Reflexionsfaktor $r = -1$ (0 dB) zu erhalten. Die Ergebnisse einer solchen Verifikation zeigen die beiden Messdiagramme (Bild 5-1: Betrag und Bild 5-2: Phase). Für die Phasendarstellungen wurde die bekannte elektrische Länge der Kurzschlussstandards subtrahiert und zusätzlich ein Phasenversatz (Offset) von 180° eingestellt.

Messergebnisse von weiteren Reflexions-Verifikationen, bei denen die gestufte Luftleitung eingesetzt wurde, zeigen die Bilder 5-3 bis 5-5.

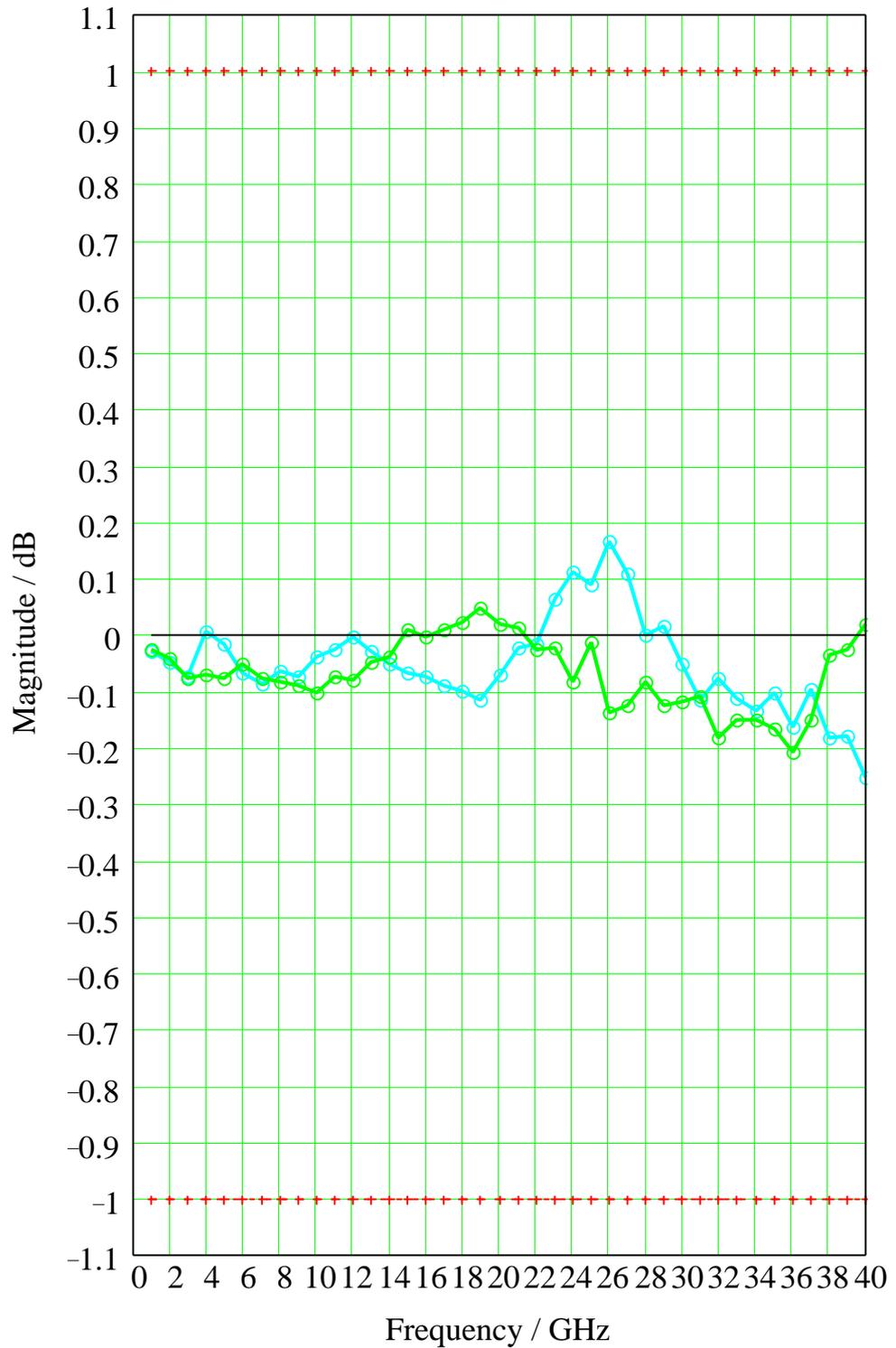


Bild 5-1 Reflexionsbetrag bei 0 dB des 2,92-mm-Kurzschlussstandards

Messergebnisse der Verifikation mit Kurzschlussstandards (blau: S₁₁, grün: S₂₂) für den Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die Genauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

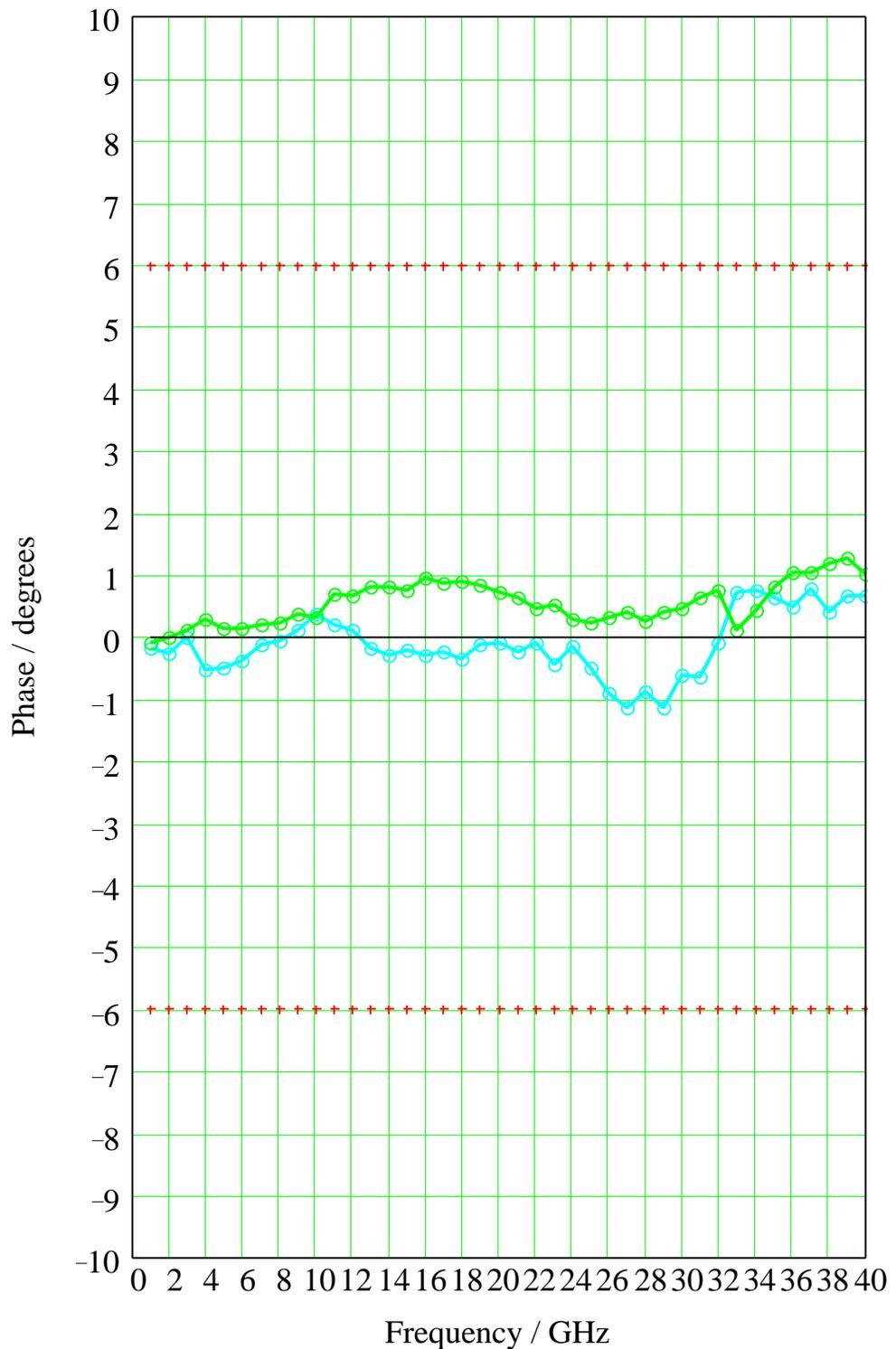


Bild 5-2 Reflexionsphase bei 0 dB des 2,92-mm-Kurzschlussstandards

Messergebnisse der Verifikation mit Kurzschlussstandards (blau: S_{11} , grün: S_{22}) für den Frequenzbereich 1 GHz bis 40 GHz. Die bekannten elektrischen Längen der Standards wurden subtrahiert und zusätzlich wurde ein Phasenversatz (Offset) von 180° eingestellt. Die Genauigkeitsspezifikationen des ZVK sind als rote Kreuze angegeben.

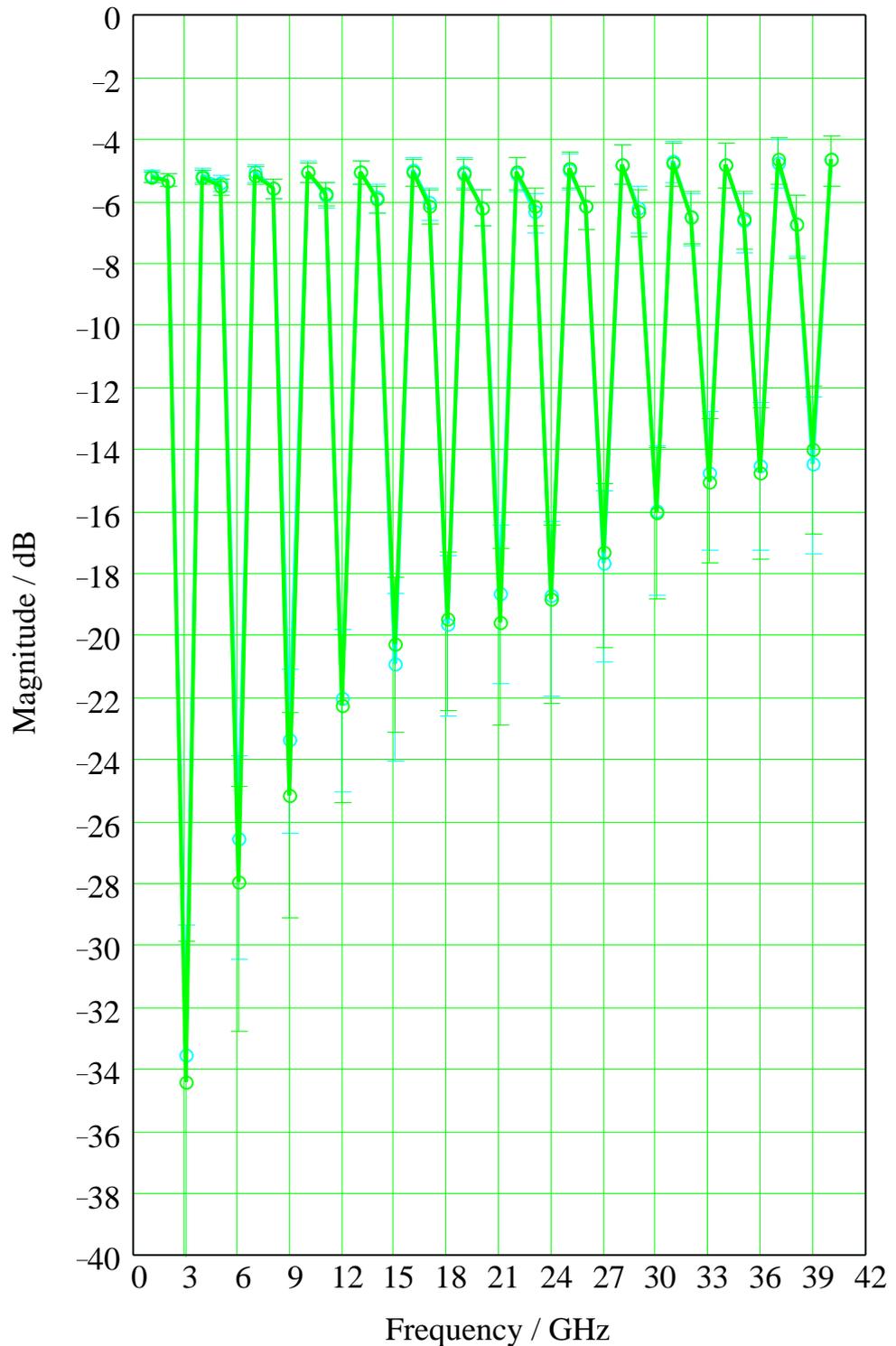


Bild 5-3 Reflexionsbetrag der gestuften Luftleitung (2,92 mm)

Betrag der vom Hersteller angegebenen Reflexion (blau: S_{11} , grün: S_{22}) für die gestufte Luftleitung. Die angegebenen Unsicherheiten für diesen Verifizierstandard sind als Toleranzbalken ergänzt. Wie man dem Bild entnehmen kann, ist er bei den Vielfachen von 3 GHz relativ gut angepasst (etwa -15 dB bis -35 dB). Dies wird durch die Lambda-Halbe-Transformation der 25- Ω -Sektion bewirkt (vgl. Bild 4-18). Bei den anderen Frequenzen ist der Reflexionsfaktor vergleichsweise hoch und in der Größenordnung von -5 dB.

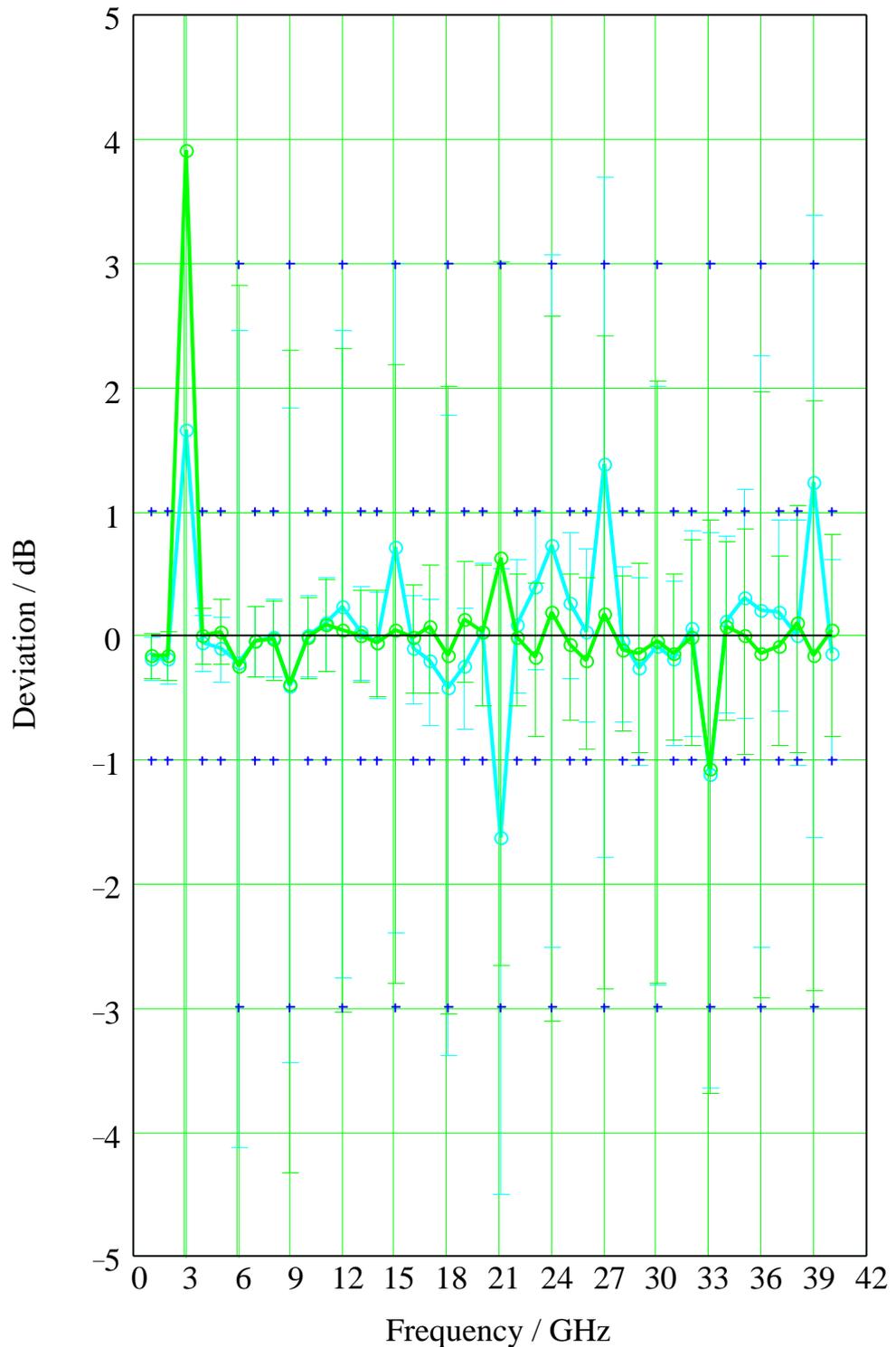


Bild 5-4 Abweichungen des **Reflexionsbetrags** der gestuften Luftleitung (2,92 mm)

Differenz (blau: S_{21} , grün: S_{12}) zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Standard. Die Unsicherheitsangaben des Herstellers sind als Toleranzbalken ergänzt. Die Reflexionsmessgenauigkeit ist im ZVK-Datenblatt für nicht-isolierende Messobjekte **nicht spezifiziert**. Zur Information sind die Messunsicherheitspezifikationen für isolierende Messobjekte mit einem frequenzabhängigen Reflexionsfaktor entsprechend dem Verifikationsstandard eingefügt (blaue Kreuze).

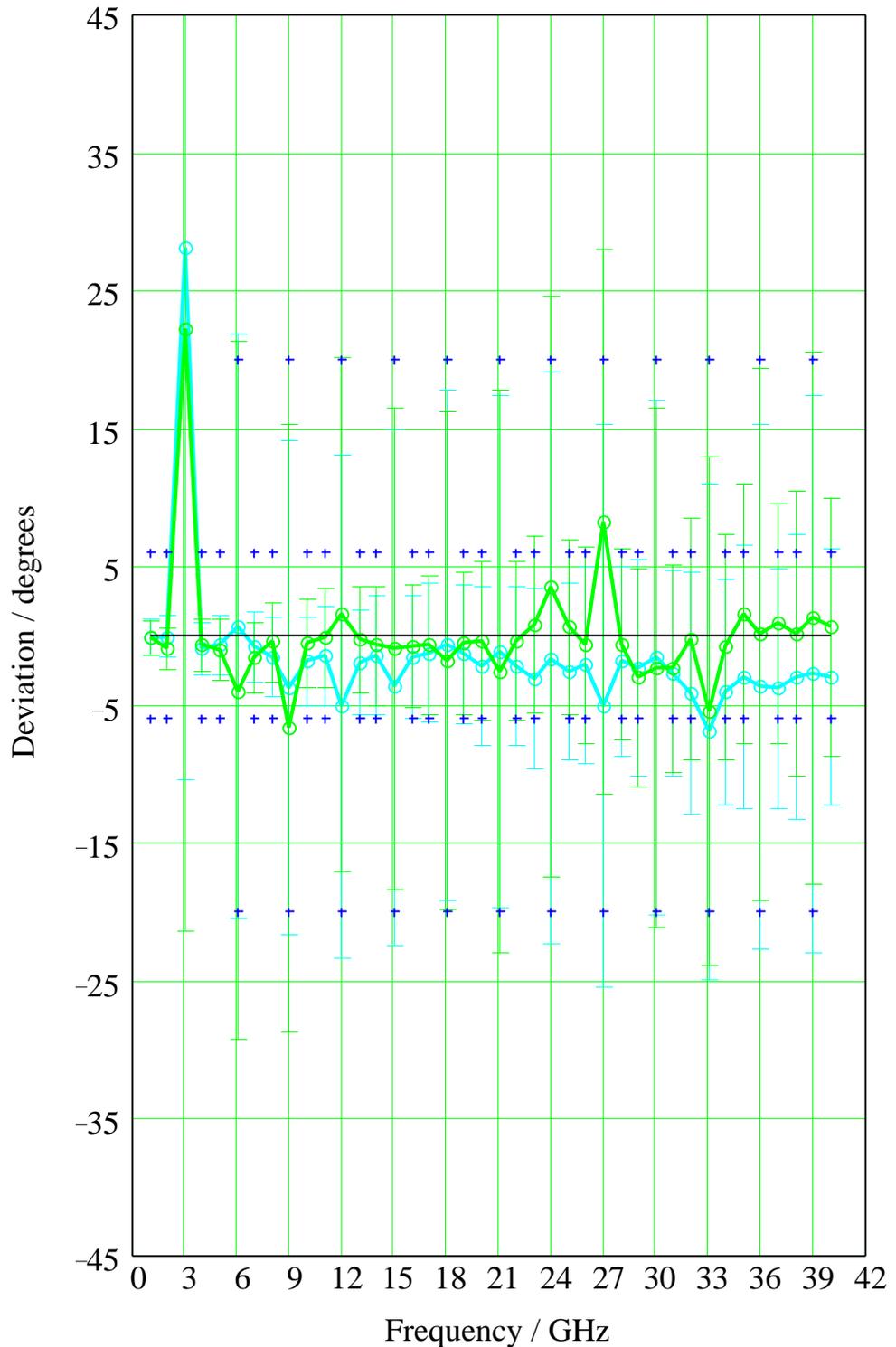


Bild 5-5 Abweichungen der **Reflexionsphase** der gestuften Luftleitung (2,92 mm)

Differenz (blau: S_{21} , grün: S_{12}) zwischen den Verifikationsmessergebnissen mit dem ZVK und den Herstellerangaben für den Standard. Die Unsicherheitsangaben des Herstellers sind als Toleranzbalken ergänzt. Die Reflexionsmessgenauigkeit ist im ZVK-Datenblatt für nicht-isolierende Messobjekte **nicht spezifiziert**. Zur Information sind die Messunsicherheitspezifikationen für isolierende Messobjekte mit einem frequenzabhängigen Reflexionsfaktor entsprechend dem Verifikationsstandard eingefügt (blaue Kreuze).

6 Effektive Systemdaten

Als dritter und letzter Teil der Verifikationsauswertungen für den Netzwerkanalysator ZVK sollen seine effektiven Systemdaten bestimmt werden. Sie beschreiben die Eigenschaften des Analysators nach durchgeführter Systemfehlerkorrektur und erlauben eine Abschätzung der möglichen Messunsicherheiten für beliebige lineare Messobjekte. Die effektiven Systemdaten des Netzwerkanalysators ZVK sind im Datenblatt (PD 757.5543.12) spezifiziert. Insgesamt werden zwölf unterschiedliche effektive Systemdaten zur vollständigen Charakterisierung eines Zweitor-Netzwerkanalysators benötigt. Davon beschreiben sechs die effektiven Eigenschaften des Analysators am Messtor PORT 1 beziehungsweise für Messungen in Vorwärtsrichtung. Die anderen sechs analogen Terme beschreiben die Eigenschaften an PORT 2 beziehungsweise in Rückwärtsrichtung. Die jeweiligen Spezifikationen in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung sind identisch. Für jede Richtung kann man im einzelnen die folgenden sechs effektiven Systemdaten unterscheiden:

- Direktivität,
- Quelltoranpassung,
- Reflexionsgleichlauf,
- Lasttoranpassung,
- Transmissionsgleichlauf und
- Übersprechen.

Die oberen drei effektiven Systemdaten sind für die effektive Messgenauigkeit bei Reflexionsmessungen verantwortlich. Die Genauigkeit bei Transmissionsmessungen wird zusätzlich durch die übrigen drei Terme beeinflusst. Für alle Arten von Messungen, seien es Reflexions- oder Transmissionsmessungen, sollte stets beachtet werden, dass zur vollständig systemfehlerkorrigierten Darstellung jedes einzelnen S-Parameters eines Zweitor-Messobjektes, durch den Netzwerkanalysator stets alle vier komplett gemessen werden müssen.

Zur Ermittlung der effektiven Systemdaten wurden weitere Verifikationsmessungen durchgeführt. Nach erfolgter TOM-Kalibrierung (inklusive der Verwendung von Gleitlasten) wurden zunächst Reflexionsmessungen an den beiden kalibrierten Referenzebenen durchgeführt. Hierzu wurden verschiedene Eintor-Standards, nämlich Leerlauf (OPEN), Kurzschluss (SHORT) und Abschluss (MATCH) an die Referenzebenen kontaktiert. Ferner wurde die Reflexion der 50- Ω -Luftleitung als Eintorstandard gemessen. In einem Fall war sie dabei an ihrem zweiten Tor mit einem Abschluss abgeschlossen und - im anderen Fall - mit einem Kurzschluss. Darüber hinaus wurden die Zweitor-Verifikationen mit der 50- Ω -Luftleitung wiederholt und dabei zusätzlich eine Zeitbereichstransformation sowie Filterungen im Zeitbereich mit Hilfe von Zeittoren durchgeführt.

Zur Einleitung zeigen die Bilder 6-1 bis 6-9 einige relevante Messungen im Frequenz- und Zeitbereich. Die effektiven Systemdaten werden in den dahinter folgenden Diagrammen dargestellt (Bilder 6-10 bis 6-19). Effektive Quelltoranpassung und Reflexionsgleichlauf wurden direkt aus den Eintorverifikationen im Frequenzbereich ermittelt. Dagegen sind effektive Direktivität und Lasttoranpassung mit Hilfe der 50- Ω -Luftleitung und einer anschließenden Filterung im Zeitbereich bestimmt worden.

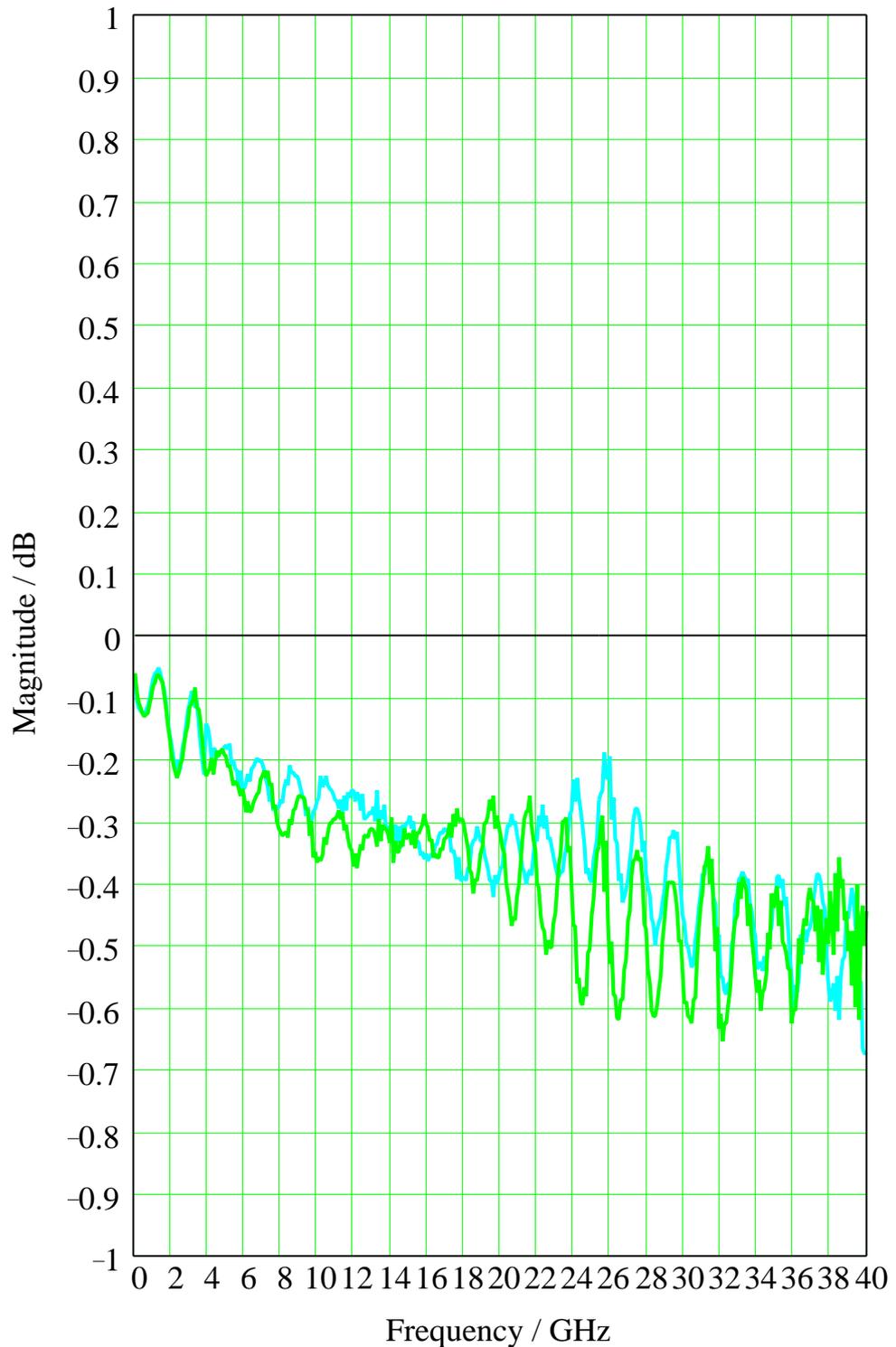


Bild 6-1 Reflexion der kurzgeschlossenen **2,92-mm**-Luftleitung (blau an PORT 1, grün an PORT 2)

Reflexion der mit dem Kurzschlussstandard kurzgeschlossenen 50- Ω -Luftleitung (2,92 mm). Die auftretende Welligkeit von max. $\pm 0,15$ dB erlaubt eine Abschätzung der effektiven Quelltoranpassung zu min. 35 dB. Die Messung wurde durch die endliche Direktivität des Analysators beeinträchtigt. Dies wird besonders bei der Frequenz 4 GHz deutlich (Welligkeitsamplitude springt), bei der während der Kalibrierung zwischen einem festen Abschluss (mit etwa 42 dB Anpassung) und einer Gleitlast gewechselt wurde.

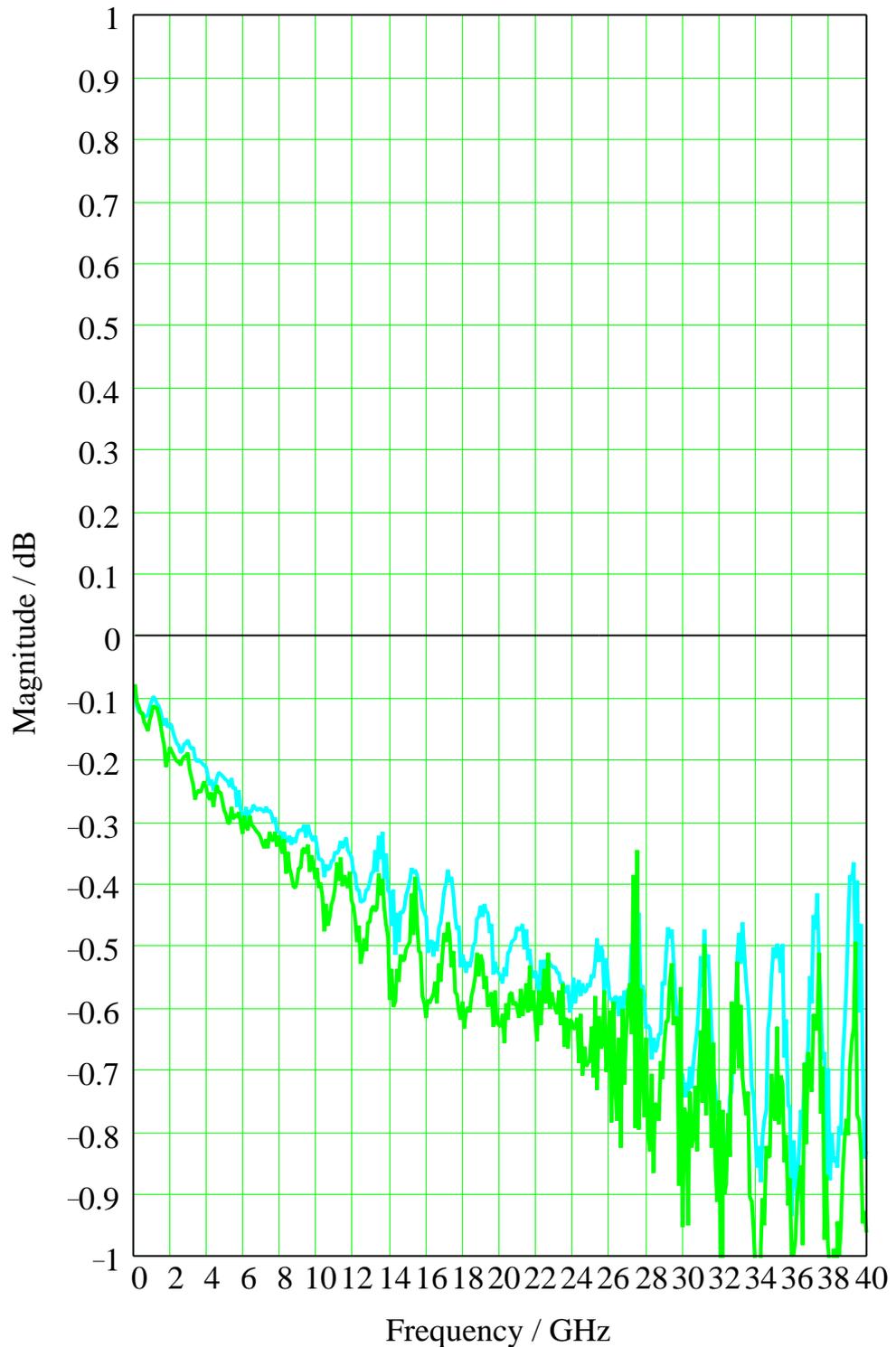


Bild 6-2 Reflexion der kurzgeschlossenen **3,5-mm**-Luftleitung (blau an PORT 1, grün an PORT 2)

Reflexion der mit dem Kurzschlussstandard kurzgeschlossenen 50- Ω -Luftleitung (3,5 mm). Im Vergleich zu Bild 6-1 ist die hier auftretende Welligkeit (im Bereich bis 26,5 GHz) geringer ($\pm 0,1$ dB Welligkeit entspricht 39 dB Anpassung). Dies ist auf die höhere Präzision der 3,5-mm-Kalibrierstandards im Vergleich zum 2,92-mm-Kalibriersatz zurückzuführen. Da die höchste sinnvolle Frequenz für das 3,5-mm-System 26,5 GHz beträgt, haben die Messergebnisse für höhere Frequenzen nur informativen Charakter.

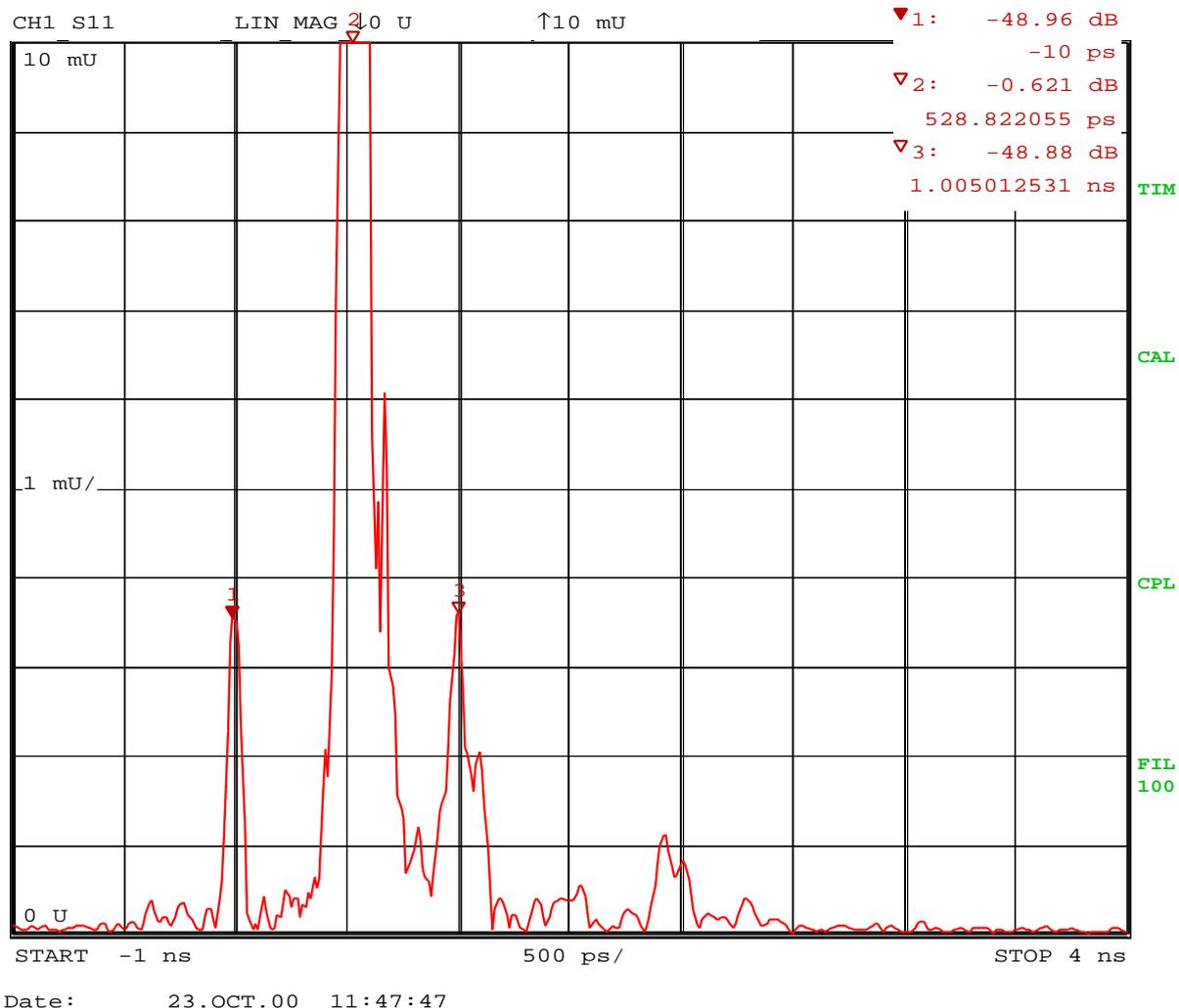


Bild 6-3 Zeitbereichsantwort der **kurzgeschlossenen 50-Ω-Luftleitung (2,92 mm)** an PORT 1

Dargestellt ist die Impulsantwort für die Reflexion der **2,92-mm-50-Ω-Luftleitung** am Messtor PORT 1. Die Luftleitung wurde mit einem Kurzschlussstandard (SHORT) kurzgeschlossen. Der Frequenzbereich war 100 MHz bis 40 GHz. Nach Transformation in den Zeitbereich erkennt man hauptsächlich drei Reflexionen. Der erste Impuls (Betrag etwa -48 dB) wird teilweise durch die endliche effektive **Direktivität** des Netzwerkanalysator hervorgerufen. Zum anderen Teil wird er auch durch den Impedanzsprung der nicht perfekt angepassten Luftleitung verursacht. Der zweite Impuls (-0,6 dB) repräsentiert die am Ende der Luftleitung durch den Kurzschlussstandard verursachte Totalreflexion, die um die doppelte Dämpfung der Luftleitung abgeschwächt wird. Der dritte Impuls (-48 dB) wird zum Teil durch die effektive Quelltoranpassung hervorgerufen; jedoch auch er wird zusätzlich durch die endliche Anpassung der 50-Ω-Luftleitung verursacht ($|S_{22}| = 0,008$ oder -42 dB bei 40 GHz, laut Tabelle 3-1). Die Länge der Luftleitung von 75 mm bewirkt eine Laufzeit von jeweils 500 ps für die einzelnen Impulse.

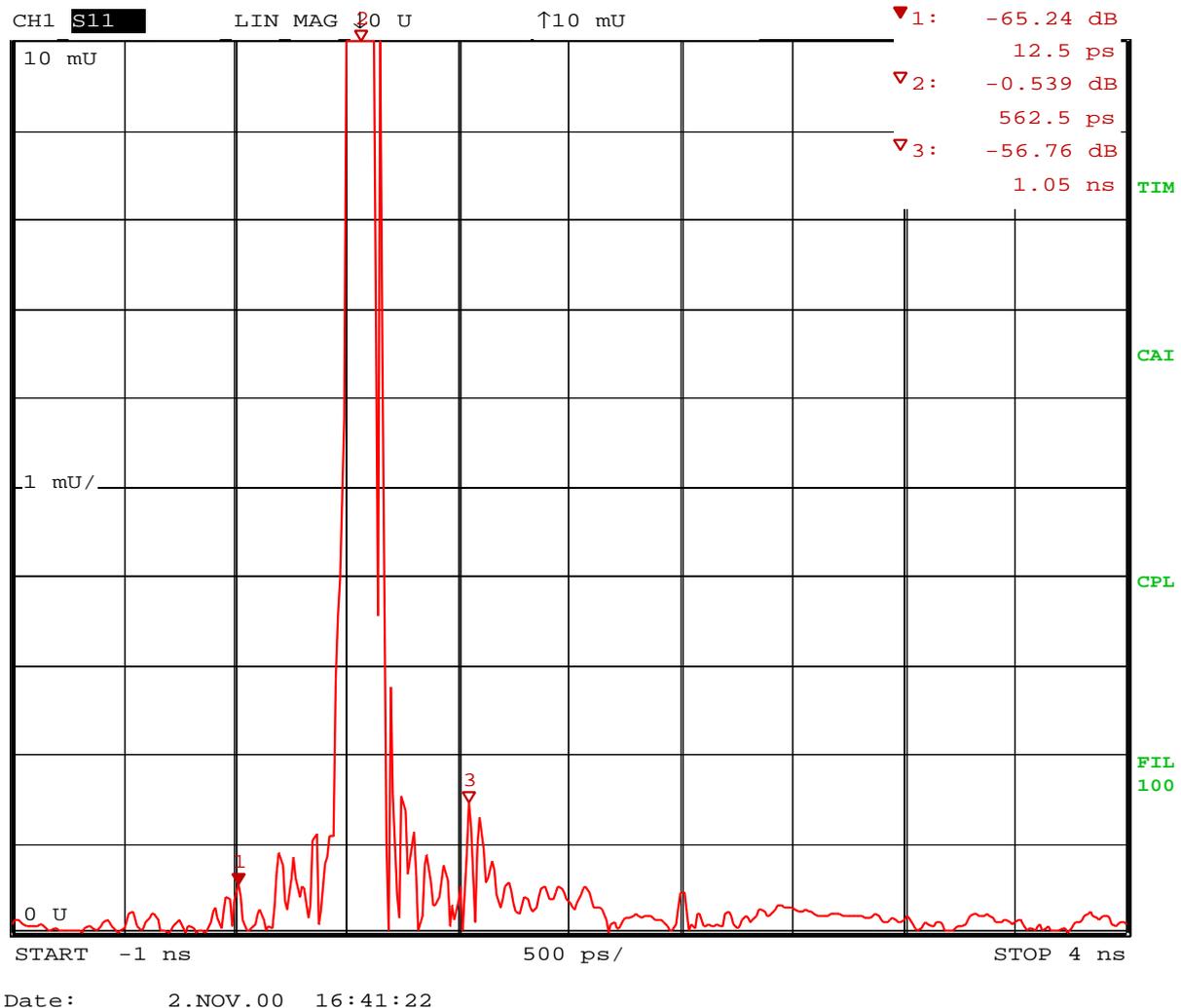


Bild 6-4 Impulsantwort der **kurzgeschlossenen 50-W-Präzisionsluftleitung (3,5 mm)** an PORT 1

Im Unterschied zum vorigen Bild 6-3 ist hier die Reflexion der kurzgeschlossenen **3,5-mm-50-Ω-Luftleitung** im Zeitbereich dargestellt. Der Frequenzbereich wurde auf 100 MHz bis 20 GHz eingengt. Wieder wurden hauptsächlich drei Reflexionen beobachtet. Der erste Impuls (Betrag etwa -65 dB) kann der effektiven **Direktivität** zugeordnet werden. Der zweite (-0,5 dB) wird durch die Totalreflexion des Kurzschlusses am Ende der Luftleitung verursacht, wobei er durch die doppelte Leitungsdämpfung abgeschwächt wird. Der dritte Impuls (-56 dB) resultiert aus der effektiven **Quelltoranpassung**. Alle Impulse werden zusätzlich durch die endliche Anpassung der Luftleitung beeinflusst. Ihre Länge von 75 mm bewirkt eine Zeitverzögerung von 500 ps zwischen den einzelnen Impulsen. Aufgrund des kleineren Frequenzbereichs (20 GHz statt 40 GHz wie in Bild 6-3), der besseren Anpassung der 3,5-mm-Luftleitung (58 dB bei 20 GHz) verglichen mit der 2,92-mm-Luftleitung (44 dB bei 40 GHz) und auch der höheren Präzision der 3,5-mm-Kalibrierstandards im Vergleich zum 2,92-mm-Kalibriersatz, sind die hier auftretenden reflektierten Impulse deutlich kleiner als die im Bild 6-3.

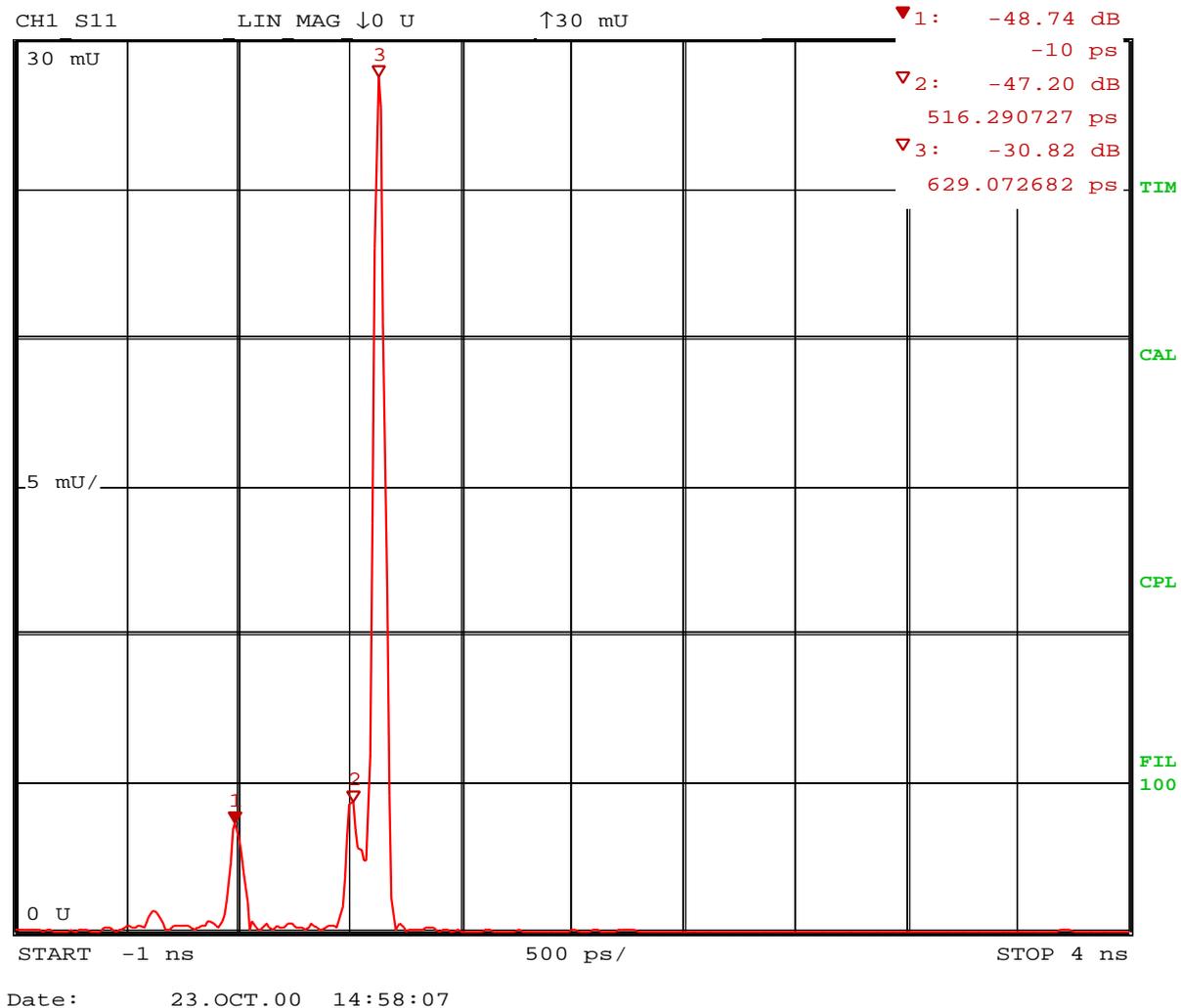


Bild 6-5 Zeitbereichsreflexion der **abgeschlossenen 2,92-mm-Luftleitung** an PORT 1

Hier ist die Impulsantwort der mit dem **festen Abschlusswiderstand** (fixed MATCH) aus dem 2,92-mm-Kalibriersatz abgeschlossenen 50- Ω -Luftleitung an PORT 1 dargestellt. Der Frequenzbereich betrug 100 MHz bis 40 GHz. Im Zeitbereich ließen sich drei Reflexionen unterscheiden. Die erste Impuls (Betrag etwa -48 dB) wird teilweise durch die effektive Direktivität, aber auch durch den Impedanzsprung am Anfang der Luftleitung hervorgerufen. Der zweite (-47 dB) wird durch die Leitungsdiskontinuität beim Übergang von der Luftleitung auf den festen Abschlusswiderstand verursacht. Der dritte Impuls entsteht durch die Reflexion im Abschlusswiderstand selbst. Deutlich zeigt sich, dass die durch ihn ausgelöste Reflexion (-30 dB) bei weitem nicht vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund werden bei der Systemfehlerkalibrierung zur Erzielung einer hohen effektiven Direktivität speziell für hohe Frequenzen statt fester Abschlusswiderstände lieber Gleitlasten (Sliding MATCHES) oder - im Rahmen der TRL-Kalibrierungsmethode - auch Präzisions-Luftleitungen (AIRLINES) eingesetzt.

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

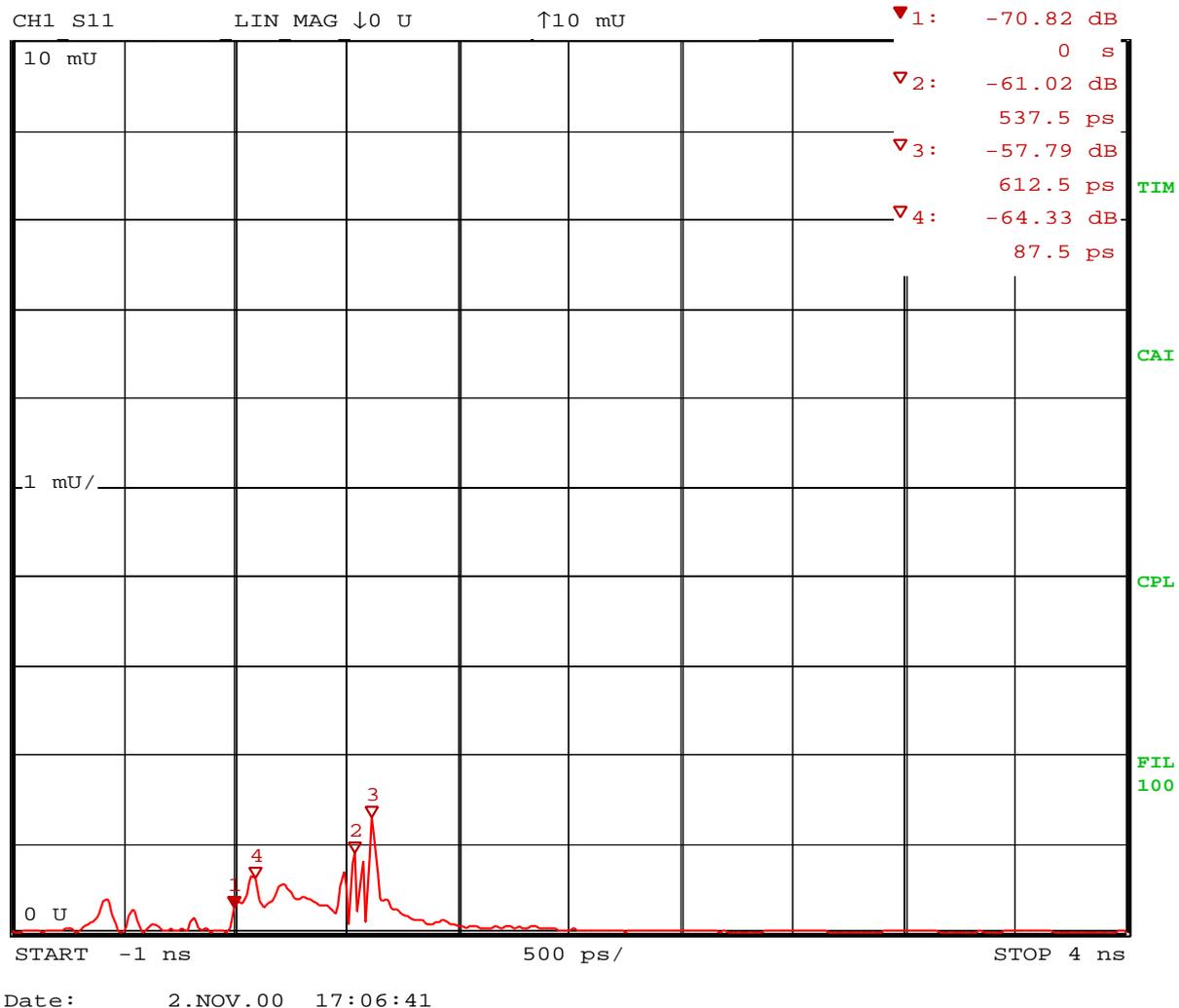


Bild 6-6 Impulsantwort der abgeschlossenen **3,5-mm-Präzisionsluftleitung** an PORT 1

Die Reflexionen der 3,5-mm-50-Ω-Präzisionsluftleitung sind nach Transformation in den Zeitbereich dargestellt. Die Luftleitung war mit dem festen Abschlusswiderstand (fixed MATCH) aus dem 3,5-mm-Kalibriersatz abgeschlossen. Der Frequenzbereich betrug 100 MHz bis 20 GHz. Auffällig ist, dass im Vergleich zu Bild 6-5 hier die Beträge der Impulse deutlich kleiner sind. Dies kann teilweise durch den geringeren Frequenzbereich (nur 20 GHz anstelle von 40 GHz) erklärt werden. Hauptgrund ist jedoch die höhere Qualität der 3,5-mm-Kalibrierstandards und der 3,5-mm-Luftleitung im Vergleich zu den 2,92-mm-Komponenten.

Insgesamt können vier Reflexionen unterschieden werden. Der erste Impuls (Betrag etwa -70 dB) kann im Wesentlichen wieder der effektiven **Direktivität** des Netzwerkanalysators zugeschrieben werden. Impuls ▽2 (-61 dB) wird durch die Leitungsdiskontinuität am Ende der Luftleitung beim Übergang auf den Abschlusswiderstand (MATCH) hervorgerufen, während Impuls ▽3 (-58 dB) durch den Abschlusswiderstand selbst verursacht wird. Offenbar ist sein Reflexionsfaktor deutlich kleiner als der des 2,92-mm-Abschlusses von Bild 6-5.

Anders als die 2,92-mm-Luftleitung, die für die Messungen des vorigen Bildes 6-5 benutzt wurde, weist die hier verwendete 3,5-mm-Luftleitung eine dünne dielektrische Scheibe als Stütze für den Innenleiter auf, die sich unmittelbar am Beginn der Luftleitung befindet. Der elektrische Einfluss dieser Stütze auf die Impedanz der Luftleitung ist offensichtlich exzellent kompensiert. Dennoch wird die durch sie verursachte (geringe) Störung durch den ZVK detektiert und kann bei Marker ▽4 (-64 dB) erkannt werden.

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

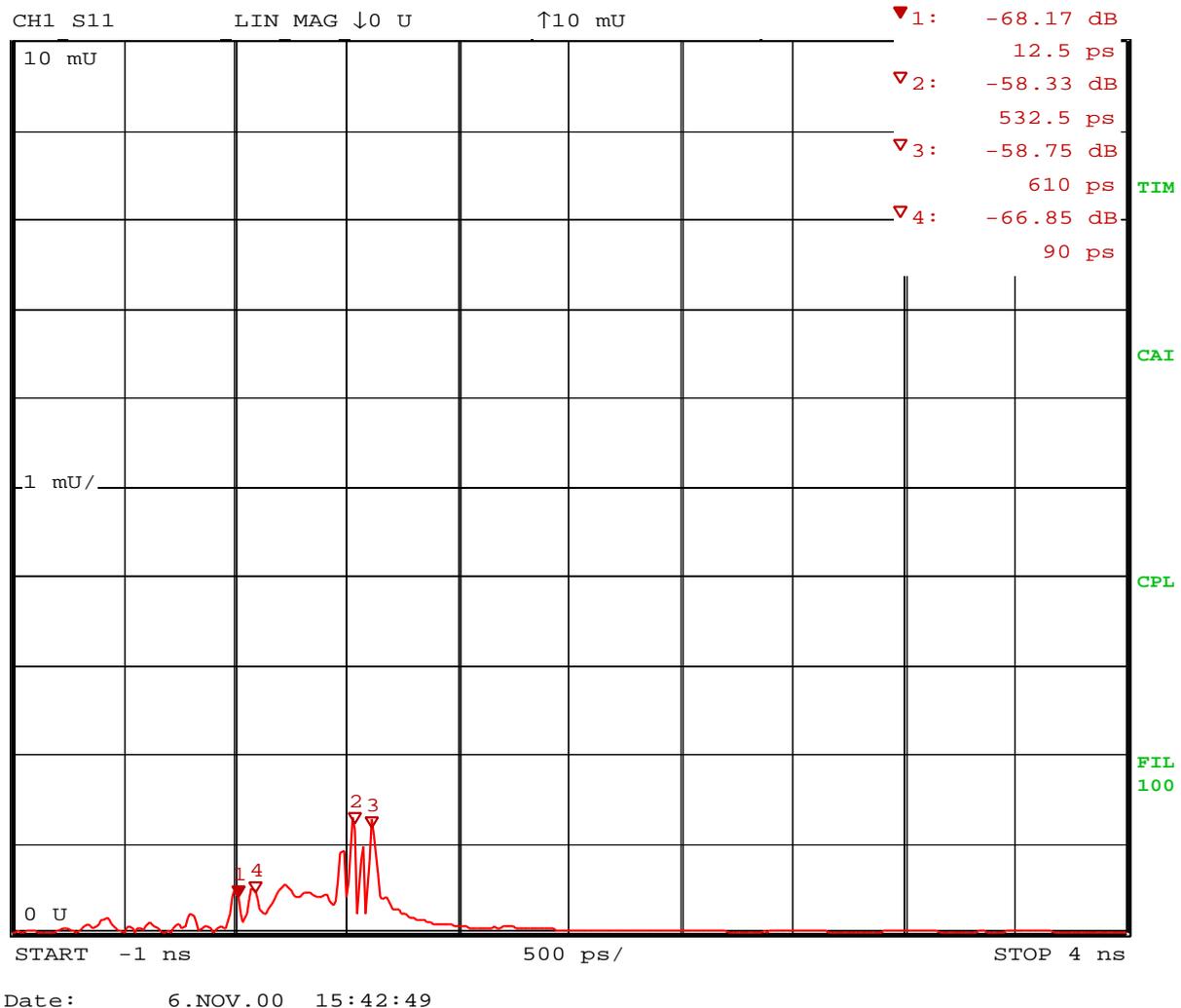


Bild 6-7 Impulsantwort der abgeschlossenen **3,5-mm-Präzisionsluftleitung** an PORT 1

Wie in Bild 6-6 sind auch hier noch einmal die Reflexionen der 3,5-mm-50-Ω-Präzisionsluftleitung nach Transformation in den Zeitbereich dargestellt. Der Messaufbau war identisch zu dem von Bild 6-6 mit dem Unterschied, dass inzwischen **vier Tage vergangen** waren. Die Luftleitung war während dieses Zeitraums nicht angeschlossen und wurde erst unmittelbar vor dieser Messung rekontaktiert. Es wurde keine neue Kalibrierung des Netzwerkanalysators durchgeführt.

Ein Vergleich mit den Messergebnissen von Bild 6-6 zeigt die gute Übereinstimmung beider Messungen. Dies ist ein wichtiger Hinweis auf die gute Stabilität des Netzwerkanalysators ZVK sowie die exzellente Wiederholbarkeit der Steckverbindungen.

Sämtliche in dieser Applikationsschrift gezeigten Messungen wurden in einem üblichen Laborraum ohne spezielle Klimatisierung durchgeführt.

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

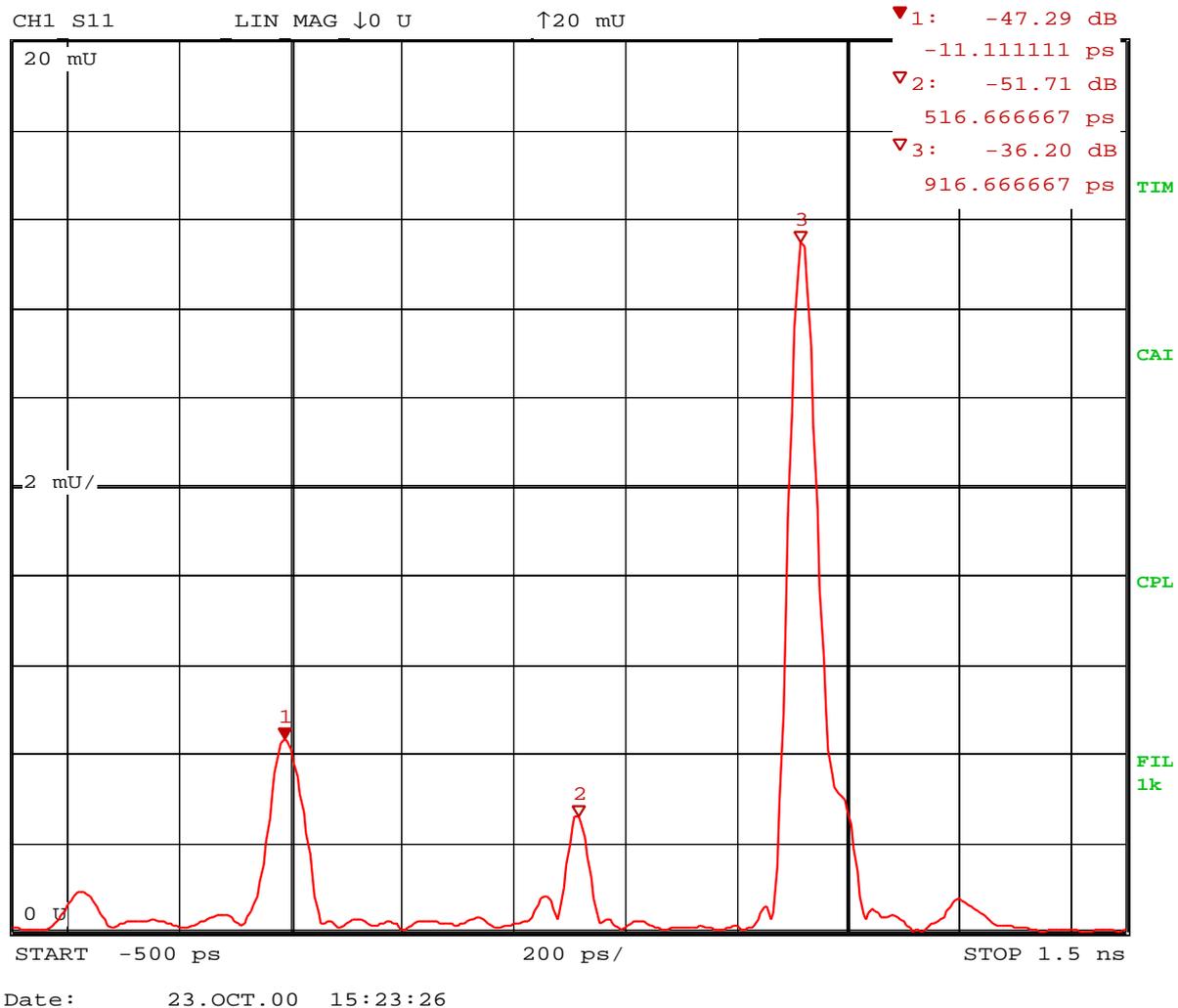


Bild 6-8 Impulsantwort der abgeschlossenen **2,92-mm-Luftleitung** an PORT 1

Das Messdiagramm zeigt die Reflexionen der 2,92-mm-50- Ω -Luftleitung, die an ihrem hinteren Ende mit der Gleitlast aus dem 2,92-mm-Kalibriersatz abgeschlossen wurde. Der Frequenzbereich wurde mit Rücksicht auf ihren Betriebsfrequenzbereich auf 4 GHz bis 40 GHz eingengt. Drei reflektierte Impulse sind sichtbar. Der erste (-47 dB) wird durch die endliche effektive **Direktivität** des Netzwerkanalysators und durch den Reflexionsfaktor des vorderen Endes der Luftleitung bewirkt. Der zweite Impuls (-52 dB) wird durch die Leitungsdiskontinuität am hinteren Ende der Luftleitung und den Impedanzsprung beim Übergang auf die Gleitlast hervorgerufen. Der dritte Impuls (-36 dB) stammt von dem verschiebbaren Ferritelement im Inneren der Gleitlast .

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

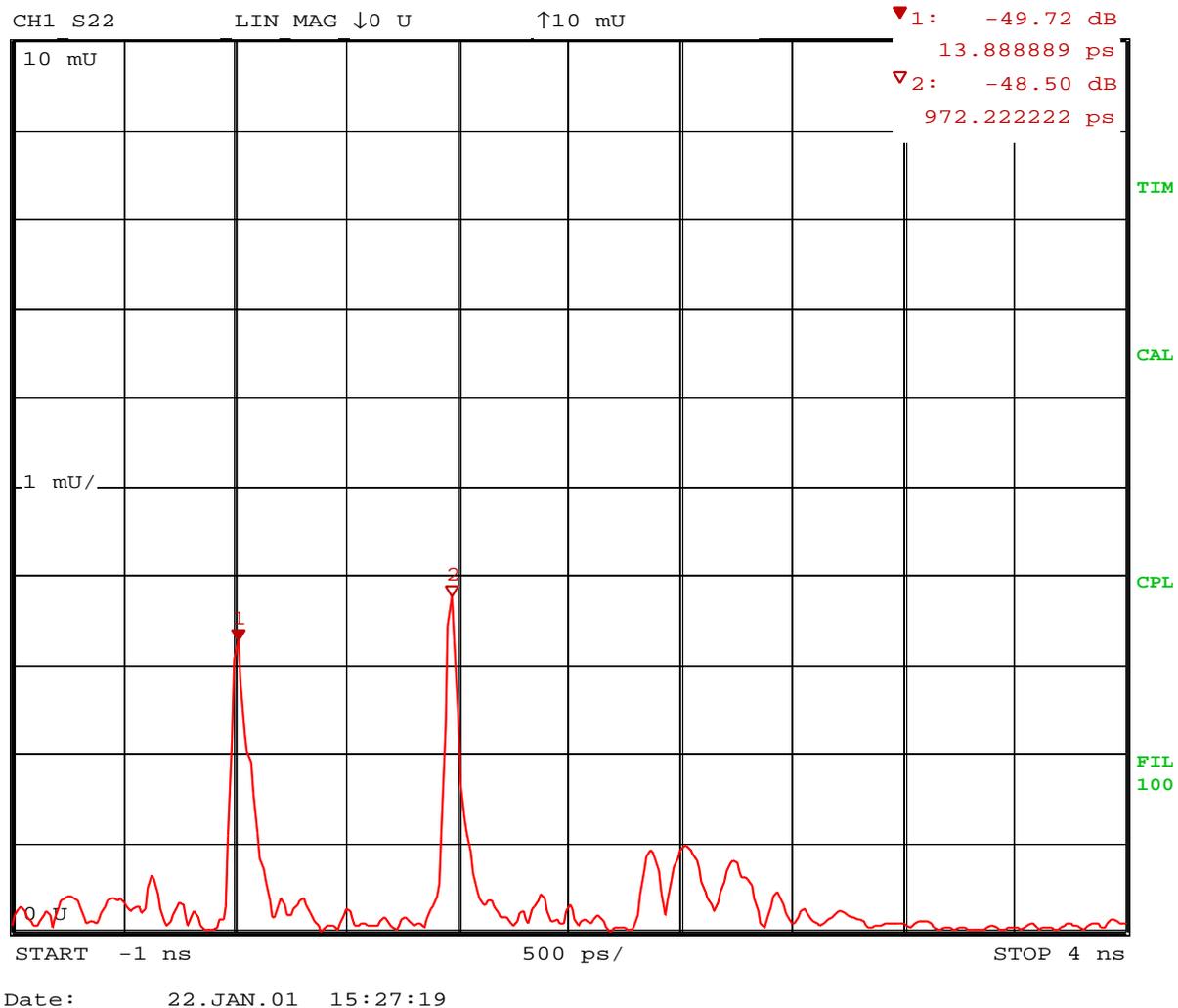


Bild 6-9 Zeitbereichsreflexionen einer **2,92-mm-Luftleitung**

Für diese Verifikationsmessung wurde eine reflexionsarme 2,92-mm-50- Ω -Luftleitung (Model 8774C15 von Maury Microwave) mit einer Länge von 149,90 mm direkt zwischen die beiden kalibrierten Referenzebenen eingefügt. Der Frequenzbereich betrug 4 GHz bis 40 GHz. Nach Transformation in den Zeitbereich und Darstellung der Impulsantwort sind hauptsächlich zwei reflektierte Impulse zu erkennen. Der erste Impuls (-49,7 dB) wird zum Teil durch die endliche effektive **Direktivität** des Netzwerkanalysators hervorgerufen. Er wird jedoch auch durch den unvermeidlichen Impedanzsprung am vorderen Ende der Luftleitung beeinflusst. Der zweite Impuls (-48,5 dB) wird ebenso zu einem gewissen Teil durch den Impedanzsprung am hinteren Ende der Luftleitung verursacht und zum anderen durch die endliche effektive **Lastanpassung** hervorgerufen.

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

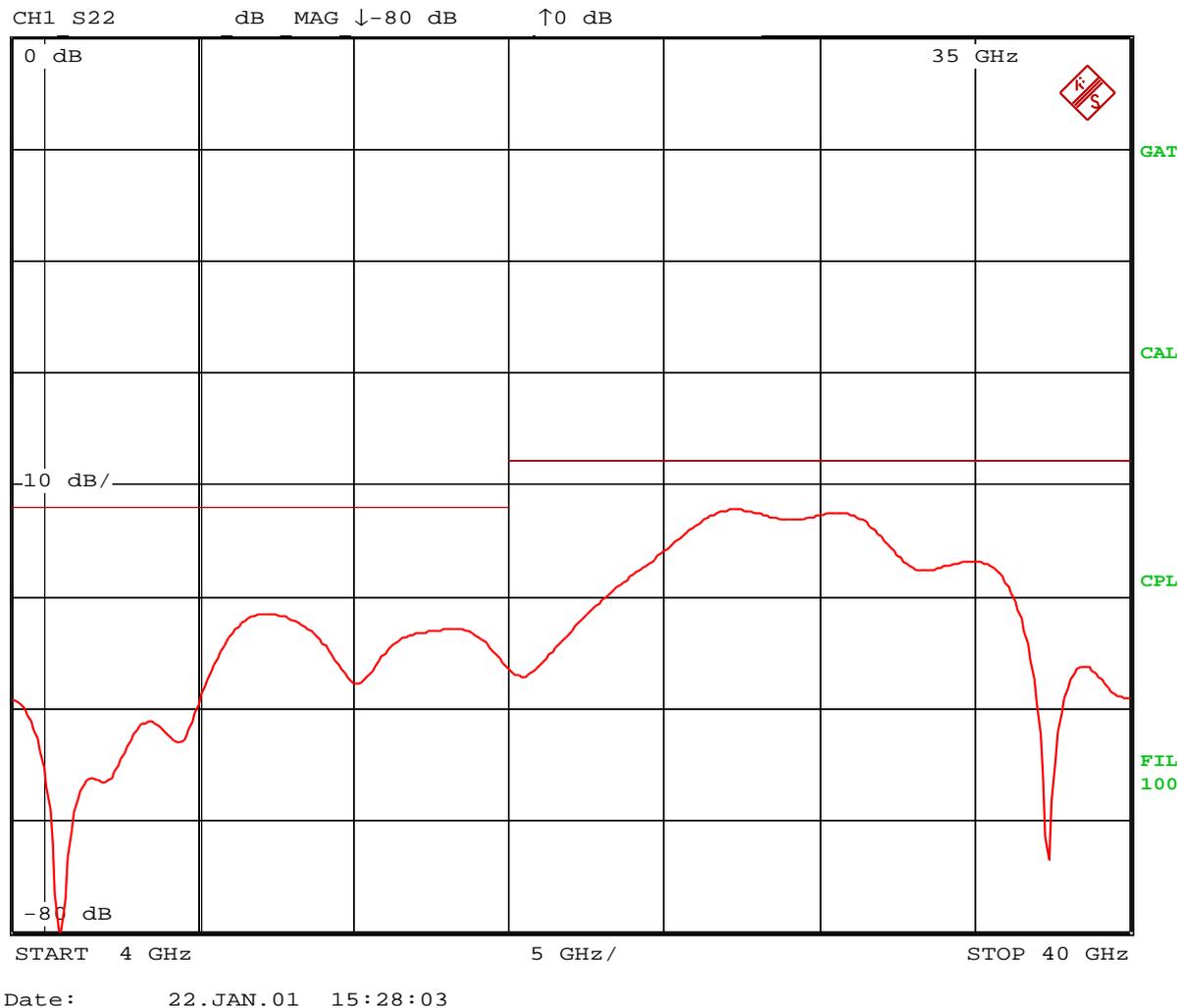


Bild 6-10 Effektive **Direktivität** nach **2,92-mm-Kalibrierung**

Die Zeitbereichsmessergebnisse von Bild 6-9 wurden mit Hilfe eines 500 ps breiten Zeittores bei 0 s gefiltert, um die störenden Effekte vom hinteren Ende der Luftleitung zu unterdrücken (gate center = 0 s, gate span = 500 ps).

Die dargestellten Ergebnisse werden durch die endliche Anpassung der Luftleitung beeinflusst.

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

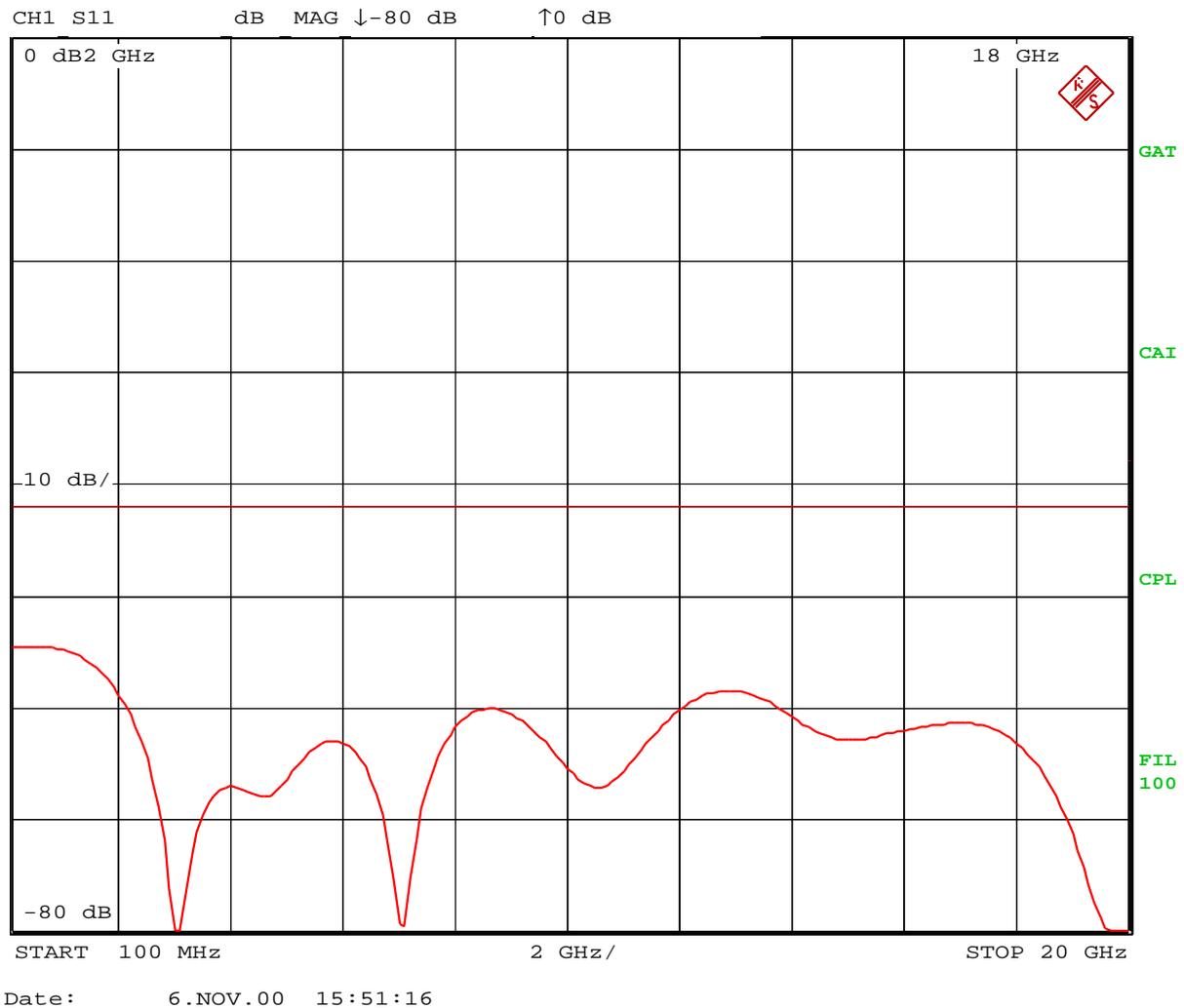


Bild 6-11 Effektive **Direktivität** nach **3,5-mm-Kalibrierung**

Die Zeitbereichsmessergebnisse von Bild 6-7 wurden mit Hilfe eines 500 ps breiten Zeittores bei 0 s gefiltert, um die störenden Effekte vom hinteren Ende der Luftleitung zu unterdrücken (gate center = 0 s, gate span = 500 ps).

Die dargestellten Ergebnisse werden durch die endliche Anpassung der Luftleitung beeinflusst.

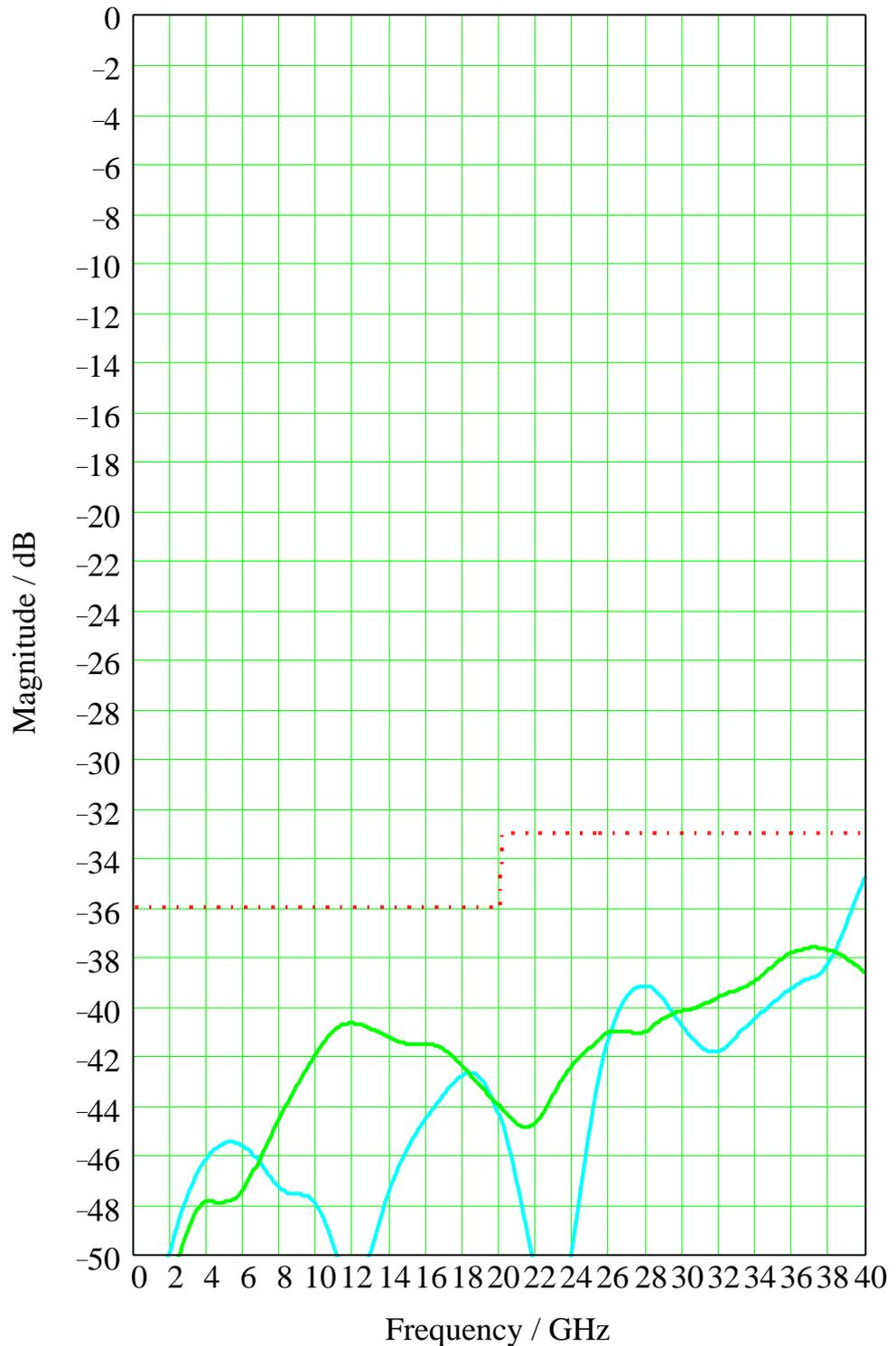


Bild 6-12 Effektive **Quelltoranpassung** nach **2,92-mm-Kalibrierung**

Die effektive Quelltoranpassung (blau: PORT 1; grün: PORT 2) wurde mit Hilfe von Verifikationsmessungen an den drei Standards Leerlauf, Kurzschluss und Abschluss (OPEN, SHORT, MATCH) ermittelt. Die dargestellten Ergebnisse werden beeinträchtigt durch die endliche Qualität des Kapazitätsmodells der Leerlaufstandards und die endliche Anpassung der Abschlussstandards.

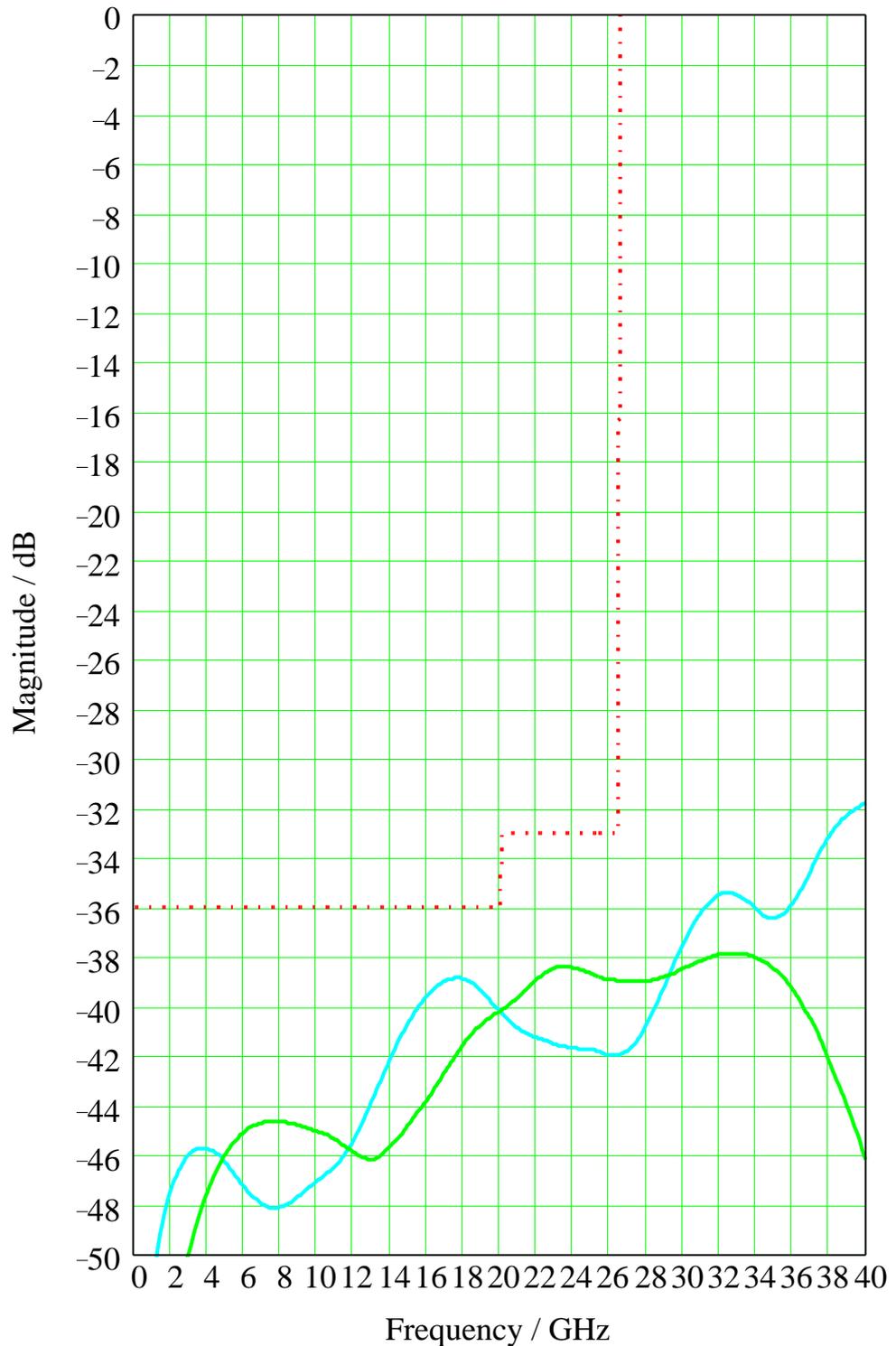


Bild 6-13 Effektive **Quelltoranpassung** nach **3,5-mm-Kalibrierung** (blau: PORT 1; grün: PORT 2)

Die effektive Quelltoranpassung wurde mit Hilfe von Verifikationsmessungen an den drei Standards Leerlauf, Kurzschluss und Abschluss (OPEN, SHORT, MATCH) ermittelt. Die dargestellten Ergebnisse werden beeinträchtigt durch die endliche Qualität des Kapazitätsmodells der Leerlaufstandards und die endliche Anpassung der Abschlussstandards. Aufgrund der höchsten empfohlenen Betriebsfrequenz des 3,5-mm-Stecksystems haben Ergebnisse oberhalb von 26,5 GHz nur informativen Charakter.

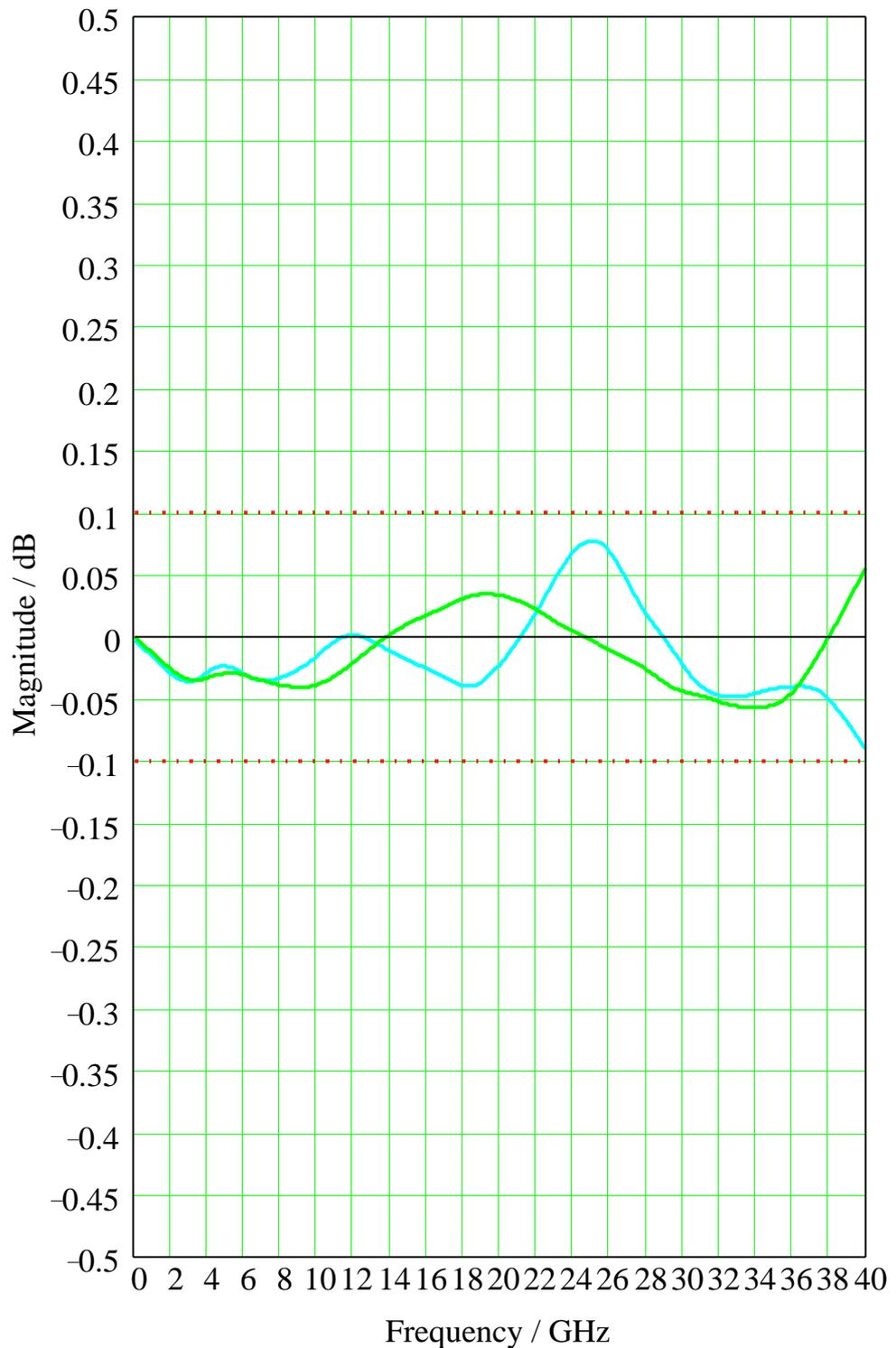


Bild 6-14 Effektiver Reflexionsgleichlauf nach 2,92-mm-Kalibrierung

Der effektive Reflexionsgleichlauf (blau: PORT 1; grün: PORT 2) wurde mit Hilfe von Verifikationsmessungen an den drei Standards Leerlauf, Kurzschluss und Abschluss (OPEN, SHORT, MATCH) ermittelt. Die dargestellten Ergebnisse werden beeinträchtigt durch die endliche Qualität des Kapazitätsmodells der Leerlaufstandards und die endliche Anpassung der Abschlussstandards.

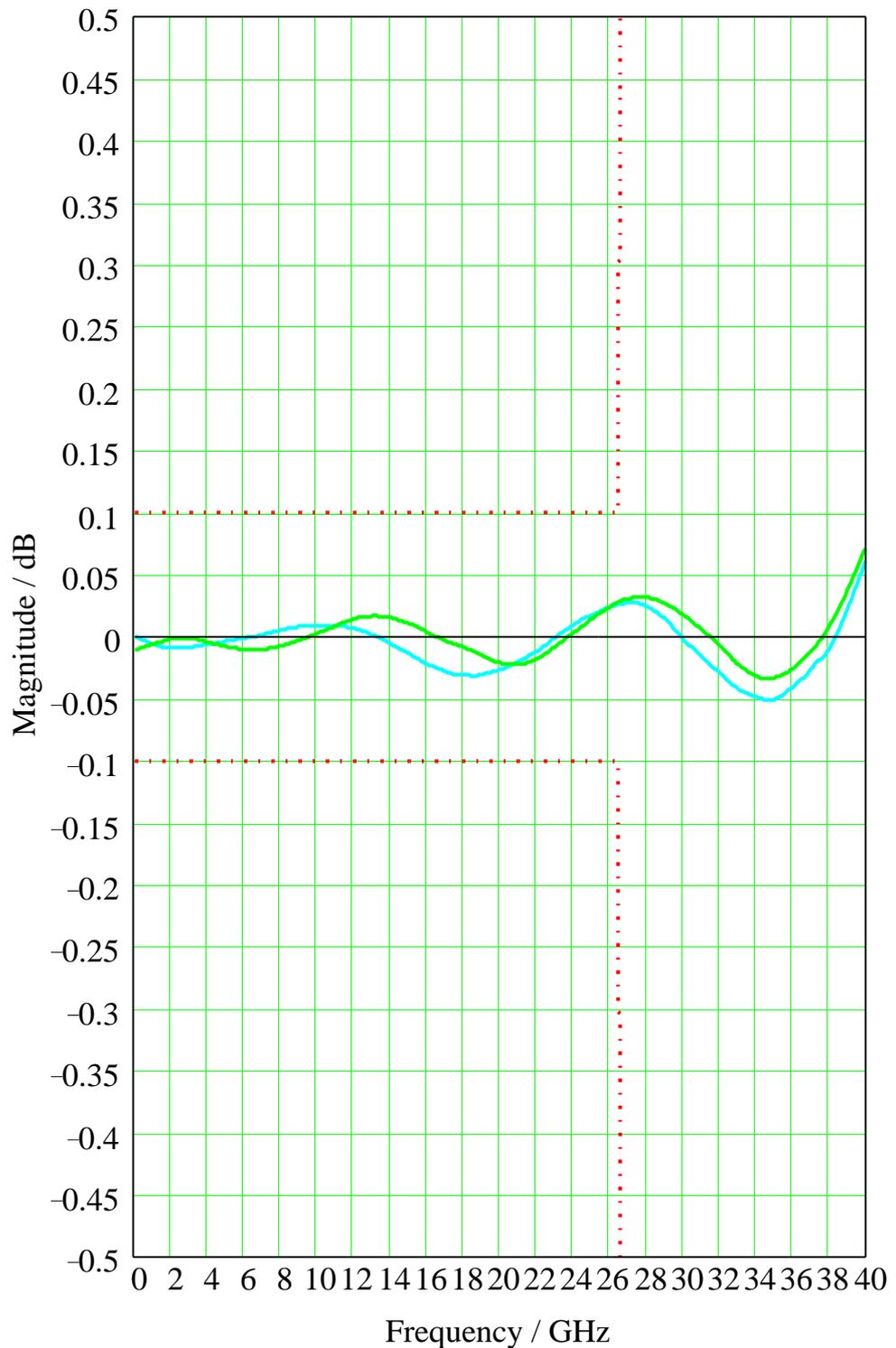


Bild 6-15 Effektiver Reflexionsgleichlauf nach 3,5-mm-Kalibrierung

Der effektive Reflexionsgleichlauf (blau: PORT 1; grün: PORT 2) wurde mit Hilfe von Verifikationsmessungen an den drei Standards Leerlauf, Kurzschluss und Abschluss (OPEN, SHORT, MATCH) ermittelt. Die dargestellten Ergebnisse werden durch die endliche Qualität des Kapazitätsmodells der Leerlaufstandards und die endliche Anpassung der Abschlussstandards beeinträchtigt. Messergebnisse oberhalb der für das 3,5-mm-System maximal zulässigen Frequenz von 26,5 GHz sollen nur zur Information dienen.

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

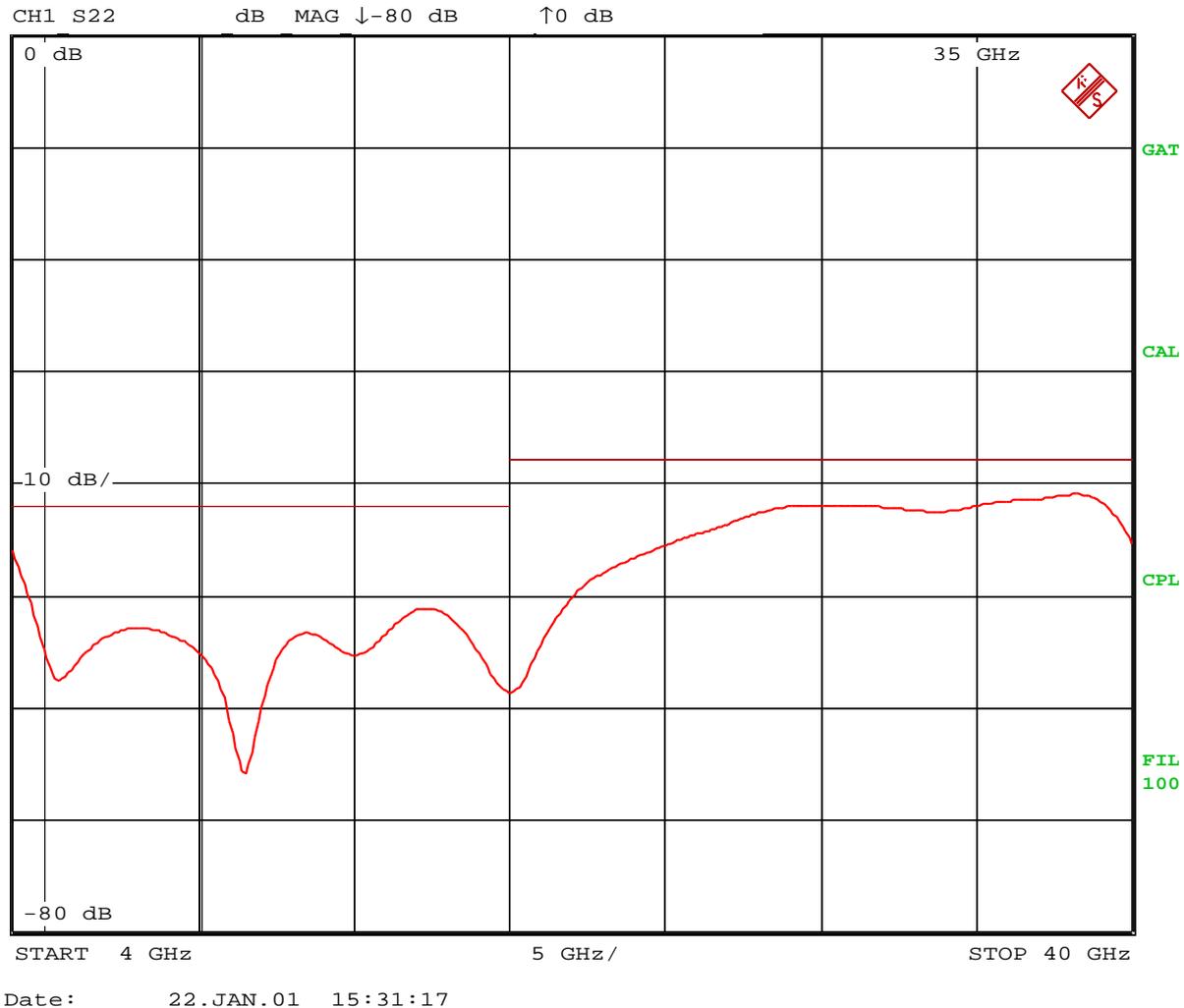


Bild 6-16 Effektive Lastoranpassung nach **2,92-mm-Kalibrierung**

Die in Bild 6-9 dargestellten Messergebnisse der 50- Ω -Luftleitung wurden mit Hilfe eines 500 ps breiten Zeittores bei 500 ps gefiltert (gate center = 500 ps, gate span = 500 ps), um den Einfluss der effektiven Direktivität und des Impedanzsprungs am vorderen Ende der Luftleitung zu unterdrücken.

Die dargestellten Ergebnisse werden durch die endliche Anpassung der Luftleitung beeinflusst.

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

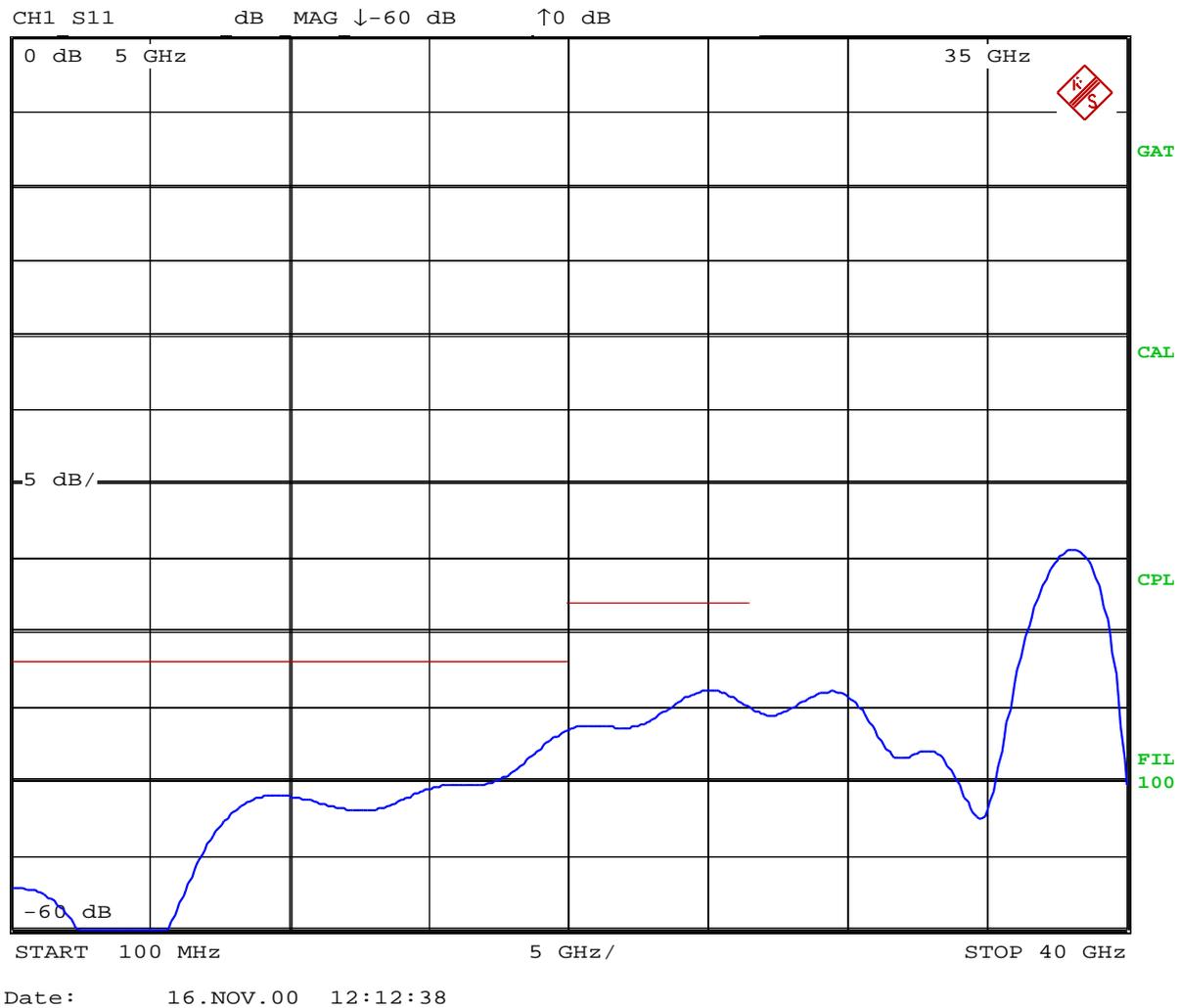


Bild 6-17 Effektive Lastoranpassung nach **3,5-mm-Kalibrierung**

Die dargestellten Ergebnisse wurden mit Hilfe einer Verifikationsmessung an der 3,5-mm-50- Ω -Luftleitung ermittelt. Der Einfluss der effektiven Direktivität und des Impedanzsprungs am vorderen Ende der Luftleitung wurden mit Hilfe eines 500 ps breiten Zeittores bei 460 ps unterdrückt (gate center = 460 ps, gate span = 500 ps). Ergebnisse oberhalb von 26,5 GHz dienen nur zur Information.

Die dargestellten Ergebnisse werden durch die endliche Anpassung der Luftleitung beeinflusst.

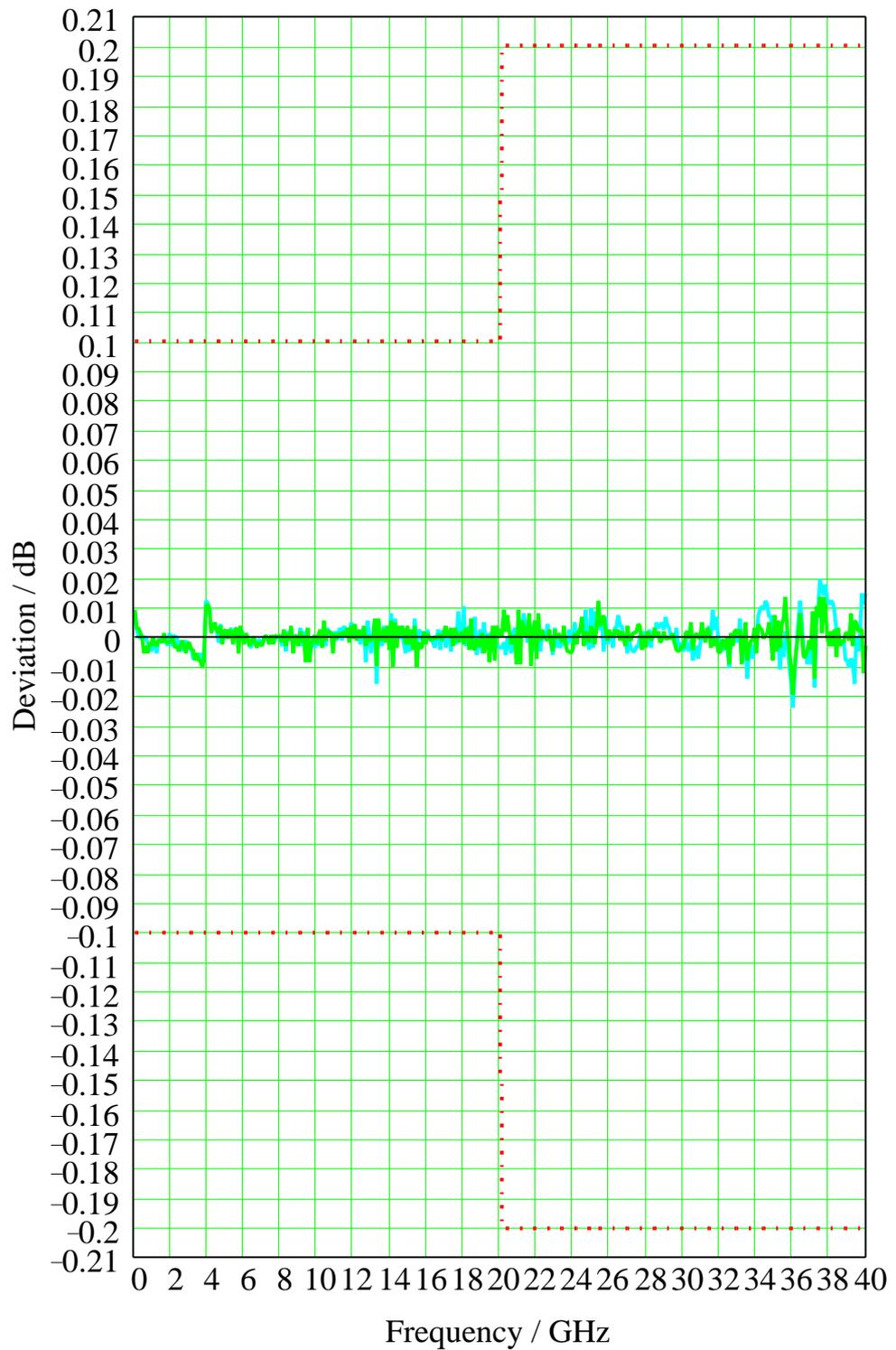


Bild 6-18 Effektiver **Transmissionsgleichlauf** nach **2,92-mm-Kalibrierung**

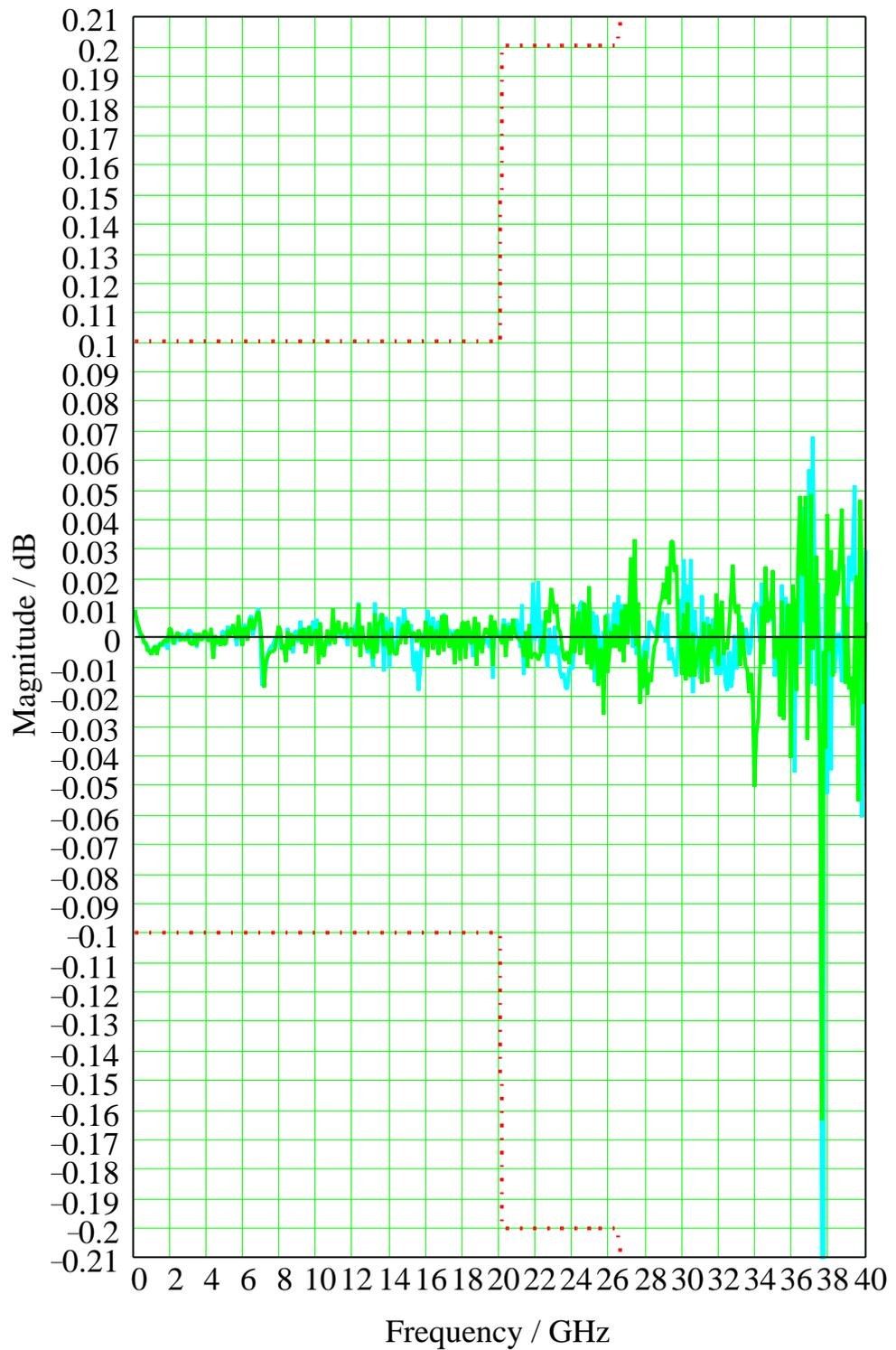


Bild 6-19 Effektiver **Transmissionsgleichlauf** nach **3,5-mm-Kalibrierung**

Da, wie schon erwähnt, die höchste nutzbare Frequenz für das 3,5-mm-Stecksystem 26,5 GHz beträgt, werden Messergebnisse oberhalb von 26,5 GHz nur zur Information dargestellt.

7 Zusammenfassung

Genauigkeit ist ein wichtiger Begriff im Zusammenhang mit Mikrowellenmessungen. Wenn auch die Ansprüche an die benötigte Messgenauigkeit je nach vorliegender konkreter Messaufgabe unterschiedlich sind, so ist gegen eine hohe Messgenauigkeit nie etwas einzuwenden.

Wie gezeigt werden konnte, ist der Netzwerkanalysator ZVK in der Lage, auch hohe Ansprüche an die Stabilität und Genauigkeit der Messungen zu erfüllen. Hierzu ist eine sorgfältige Kalibrierung des Systems unumgänglich, da aufgrund der im Messaufbau verwendeten Kabel, Adapter und anderer Komponenten sich ansonsten hohe systematische Messfehler ergeben würden. Der Netzwerkanalysator ZVK bietet hierzu geeignete Kalibrierverfahren an, wie beispielsweise die TOM-Methode (R&S-Patent), mit deren Hilfe die Systemfehler durch Kalibriermessungen erfasst werden können. Dazu werden verschiedene Kalibrierstände an die Referenzebenen des Netzwerkanalysesystems angeschlossen. Nach Beendigung der Kalibriermessungen ist der Netzwerkanalysator in der Lage, die Systemfehler über intern durchgeführte (komplexe) Berechnungen effektiv zu reduzieren und so die Messgenauigkeit entsprechend wieder zu erhöhen. Die Berechnungen werden bei modernen Netzwerkanalysatoren, wie dem ZVK, in Echtzeit durchgeführt und beeinträchtigen die Messgeschwindigkeit nicht. Die dann verfügbare *effektive* Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators wird im Wesentlichen nur noch durch die Qualität und Präzision der Kalibrierstandards beschränkt.

8 Weitere Applikationsschriften

- [1] O. Ostwald: 3-Port Measurements with Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ26_1E, 26. Juli 1996.
- [2] H.-G. Krekels: Automatic Calibration of Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ30_2E, 30. Aug. 1996.
- [3] O. Ostwald: 4-Port Measurements with Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ25_1E, 10. Okt. 1996.
- [4] T. Bednorz: Measurement Uncertainties for Vector Network Analysis, Appl. Note 1EZ29_1E, 21. Okt. 1996.
- [5] P. Kraus: Frequenzumsetzende Messungen mit dem Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ31_1D, 5. Nov. 1996.
- [6] J. Ganzert: File Transfer between Analyzers FSE or ZVR and PC using MS-DOS Interlink, Appl. Note 1EZ34_1E, 25. April 1997.
- [7] J. Ganzert: Accessing Measurement Data and Controlling the Vector Network Analyzer via DDE, Appl. Note 1EZ33_1E, 28. April 1997.
- [8] O. Ostwald: Group and Phase Delay Measurements with Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ35_1E, 10. Juli 1997.
- [9] O. Ostwald: Mehrformmessungen mit dem Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ37_2D, 10. Okt. 1997.
- [10] O. Ostwald: Fragen und Antworten zum Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ38_3D, 19. Jan. 1998.

Messgenauigkeit des Netzwerkanalysators ZVK

- [11] A. Gleißner: Interner Datentransfer zwischen Windows 3.1 / Excel und vektoriellem Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ39_1D, 23. Jan. 1998.
- [12] A. Gleißner: Power Calibration of Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ41_2E, 10 März 1998.
- [13] O. Ostwald: Pulsed Measurements on GSM Amplifier SMD ICs with Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ42_1E, 19. Mai 1998.
- [14] O. Ostwald: Zeitbereichsmessungen mit dem Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ44_1D, 19. Mai 1998.
- [15] O. Ostwald: T-Check Messgenauigkeitstest für Netzwerkanalysatoren mit Hilfe einer T-Verzweigung, Appl. Note 1EZ43_0D, 3. Juni 1998.
- [16] J. Simon: Virtuelle Transformationsnetzwerke für den Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ45_1D, 23. Sept. 1998.
- [17] J. Ganzert: Ansteuerung externer Generatoren und Leistungsmesser mit dem Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ46_0D, Okt. 1998.
- [18] A. Gleißner: Using the Frequency Conversion Mode of Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ47_0E, 18. Jan. 1999.

9 Bestellangaben

| | | |
|--|-----------------|--------------|
| Vektorieller Netzwerkanalysator | | |
| ZVK | 10 MHz...40 GHz | 1127.8651.60 |
| Option Zeitbereichstransformation | | |
| ZVR-B2 | | 1044.1009.02 |
| Messkabel | | |
| ZV-Z15 | 0...40 GHz | 1134.4193.02 |
| Kalibriersatz | | |
| ZV-Z35 | 0...40 GHz | 1128.3547.02 |



ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG · Mühldorfstraße 15 · D-81671 München · Postfach 80 14 69 · D-81614 München
Tel (089) 4129 - 0 · Fax (089) 4129 - 13777 · Internet: <http://www.rohde-schwarz.com>

Die Nutzung dieser Application Note und der mitgelieferten Programme darf nur unter Anerkennung der Nutzungsbedingungen erfolgen, die in der Download-Area der Rohde & Schwarz-Web-Site aufgeführt sind.