

ABSCHLUSSBERICHT

**Wirkungsgradverbesserung bei
Wanderfeldröhren auf 75% im Ku-Band und
68% im C-Band sowie Gewichtsreduzierung auf
600 g im Ku-Band und 700 g im C-Band**

**Teil 2:
C-Band**

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen: 50 YB 9904/9 gefördert.

Laufzeit: 01.07.1999 – 30.09.2002

März 2003

Autor	Projektleiter	Leiter Entwicklung
A. Jäger	T. Wünsche	E. Bosch

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG	3
2	EINLEITUNG	4
2.1	RAHMENBEDINGUNGEN	4
2.2	AUFGABENSTELLUNG UND ZIELE	4
3	RÖHRENKONZEPT	5
3.1	WENDELSYSTEM	5
3.1.1	<i>Wendel, Wendelträger und Hülle</i>	5
3.1.2	<i>Änderung von Wendeldurchmesser, Wendelträgerhöhe und Hülleninnendurchmesser ...</i>	6
3.1.3	<i>Änderung der Wendelgesamtlänge</i>	6
3.1.4	<i>Änderung des Wendeltapers</i>	8
3.1.5	<i>Änderung von Wendellänge, Wendelträgerbekohlungslänge und Wendelinnendurchmesser zur Verbesserung des BWO Verhaltens</i>	9
3.1.6	<i>Zusammenfassung zum Wendelsystem</i>	11
3.2	HF-ANKOPPLUNG	11
3.2.1	<i>Anpassungsblende</i>	11
3.2.2	<i>Anpassungstaper</i>	14
3.3	MAGNETSYSTEM	14
3.3.1	<i>Geometrie von Magneten und Polschuhen</i>	14
3.3.2	<i>Feldstärke des Magnetsystems</i>	15
3.4	KOLLEKTOR	16
3.4.1	<i>Eintrittsdurchmesser der Stufe 1</i>	16
3.4.2	<i>Fünfstufiger Kollektor</i>	16
3.5	KANONE	17
3.6	LINEARISIERER VERWENDBARKEIT	18
3.6.1	<i>Kompression</i>	18
3.6.2	<i>Phase, Kompressionsänderung über der Frequenz</i>	19
3.6.3	<i>Kt</i>	19
3.7	GEHÄUSE	20
3.7.1	<i>Mechanische Belastungen</i>	20
3.7.2	<i>Thermische Belastungen</i>	20
3.7.3	<i>Elektromagnetische Abschirmung</i>	21
3.7.4	<i>Massereduzierung</i>	21
4	AUFGEBAUTE RÖHREN	22
4.1	ÜBERSICHT DER AUFGEBAUTEN RÖHREN	22
4.2	ERGEBNISSE DER AUFGEBAUTEN RÖHREN	23
4.2.1	<i>Kurzbeschreibungen</i>	23
4.2.2	<i>Datenblätter</i>	27
5	QUALIFIKATIONSMODELLE (EM/Q)	39
5.1	TEMPERATURTESTS IM THERMOVAKUUM	39
5.2	SCHÜTTEL TESTS	40
5.3	SCHOCKTEST	40
6	AUSBLICK	41
7	VERZEICHNIS (TABELLEN, ABBILDUNGEN, FORMELN, LITERATUR)	42

1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieses Entwicklungsvorhabens wurden neue, verbesserte C-Band Wanderfeldröhren für den Einsatz auf Kommunikationssatelliten entwickelt.

Die HF-Ausgangsleistung dieser Röhren liegt im Bereich von 65 bis 125 W, der Frequenzbereich bei 3.4 bis 4.2 GHz.

Es darf als großer Erfolg gewertet werden, dass das gesetzte Ziel der Wirkungsgradverbesserung für zwei Leistungsklassen erreicht und teilweise sogar übertroffen wurde. Die Wirkungsgrade lagen für 65 W, 80 W und 125 W Röhren bisher bei Werten von 65 %, 57 % bzw. 62 %. Es gelang eine deutliche Steigerung auf 69 %, 63 % und 68 %. Gleichzeitig verbesserte sich bei den 65 W Röhren der Wert für die Kompression (Linearität der Amplitude) von 9,5 auf 7.5 dB.

Bei der Linearität der Phase ergab sich eine geringe Erhöhung von 47 ° auf 49 °, die akzeptiert werden kann. Beim Parameter k_t , der die Phasenänderung eines Trägers unter dem Einfluss eines zweiten Trägers beschreibt, musste eine Erhöhung von 8 °/dB auf 12 °/dB in Kauf genommen werden, was jedoch ein Linearisierer kompensieren kann.

Auch bei der Bandbreite der HF-Anpassung sind Erfolge vorzuweisen. Es gelang eine Erhöhung von 300 MHz auf 600 MHz bei einer Anpassung von 20 dB Return Loss, was einem Wellenreflektionsfaktor (VSWR) von 1.2 :1 entspricht.

Das ursprüngliche Ziel einer Massereduzierung konnte aufgrund der Priorität für die Wirkungsgradverbesserung nicht bearbeitet werden. Die Masse der neuen Röhren liegt daher wie bisher im Bereich von 800 g bis 830 g bei 65 W bis 125 W.

Die neu entwickelten Röhren wurden erfolgreich auf mechanische und thermische Umwelttauglichkeit geprüft. Die Pegel entsprechen den üblichen maximalen Werten für Wanderfeldröhren bei der Anwendung für Satelliten.

Dadurch war es bereits möglich, das neue Design in mehreren Fertigungsprojekten einzusetzen. Die erzielten Werte für den Wirkungsgrad der Fertigungsrohre stehen den Werten der Entwicklungsrohre in nichts nach. Nicht wenige Röhren zeigen Werte von über 70 %, einzelne Röhren sogar über 71 %. Darüber hinaus ergaben sich erfreulich niedrige Herstellkosten. Diese leiten sich aus einer hohen Ausbeute sowie aus Produktionsprozessen ab, die nur einen geringen Bearbeitungsaufwand erfordern.

Neue Projekte konnten wegen der Konkurrenzsituation nur aufgrund der deutlich erhöhten Wirkungsgrade gewonnen werden. Dieser Parameter überzog bisher noch gegenüber den nicht verbesserten Werten bei der Linearität und Masse der Röhre.

Das weitere Verbesserungspotential beim Wirkungsgrad der 80 W Röhre, bei der Linearität und bei der Masse der Röhre ist Gegenstand eines weiteren, neuen Entwicklungsvorhabens.

2 EINLEITUNG

2.1 Rahmenbedingungen

Der Ausgangspunkt für die Arbeiten in diesem Entwicklungsvorhaben sind die Ergebnisse des vorangegangenen Projektes „Wirkungsgradoptimierung auf 70 % im Ku-Band und auf 65 % im C-Band“ vom 1.6.1995 bis 31.12.1998. An dieses Projekt schließt sich das hier beschriebene Projekt mit der Laufzeit vom 1.7.1999 bis 30.9.2002 fast nahtlos mit nur einer kleinen zeitlichen Lücke an.

Im Vorgängerprojekt betrug bei der Röhre mit 65 W die Wirkungsgradverbesserung 6 % (von 59 auf 65 %), bei der Röhre mit 125 W war eine Steigerung von 59 % ausgehend über 62 % hinaus nicht möglich. Den Wirkungsgradverbesserungen in beiden Leistungsklassen war jedoch gemeinsam, dass der Wert für die Kompression (Linearität der Amplitude) von unter 7 dB auf bis zu 10 dB anstieg. Diese hohe Kompression verursacht Schwierigkeiten bei der Linearisierung der Wanderfeldröhre. Bei der Linearisierung wird mittels einer auf Halbleiterbasis aufgebauten komplexen Baugruppe die Nichtlinearität der Röhre zu einem großen Teil kompensiert. Das Gesamtsystem erreicht erst dadurch die für die fehlerlose Datenübertragung notwendige Linearität.

Ziel des neuen Entwicklungsprojektes musste es daher sein, die Kompression wieder auf die früheren Werte abzusenken.

Veröffentlichungen des Hauptkonkurrenten über erreichte Wirkungsgrade bis über 70 % bei Entwicklungsmustern für C-Band Röhren wurden in der Anfangsphase dieses Projektes bekannt. Diese Neuigkeiten waren ein wichtiger Faktor bei der Bewertung der Prioritäten für die verschiedenen Ziele des Projektes.

2.2 Aufgabenstellung und Ziele

Ausgehend von den oben genannten Werten des Vorgängerprojektes sollte ursprünglich ein Wirkungsgrad von 68 % erreicht werden. Aufgrund der geschilderten Konkurrenzsituation auf dem Markt für Satellitenwanderfeldröhren ist die Verbesserung des Wirkungsgrades das wichtigste Ziel dieses Entwicklungsprojektes. Aufgrund der erreichten Werte des Konkurrenten waren dann auch höhere Werte anzustreben, die Schallmauer von 70 % sollte fallen.

Wie oben gesagt, war für die Kompression ein Wert von unter 7.5 dB angepeilt. Der Wert für die Phasenlinearität sollte konstant bleiben und maximal 48 ° betragen.

Nachdem im Vorgängerprojekt im Ku-Band, insbesondere durch die Einführung einer kleineren Kanone und eines schmaleren Gehäuses, die Masse der Röhre erheblich verringert werden konnte, wurde auch der Aspekt der Massereduzierung für das C-Band als Ziel mit einer Absenkung von 800 g auf 700 g aufgenommen, allerdings mit niedrigerer Priorität.

In der folgenden Tabelle 2-1 sind die wichtigsten Ziele zusammengefasst dargestellt.

	Einheit	bisheriger Stand	Entwicklungsziel
Wirkungsgrad	%	65	68
Kompression	dB	10	7.5
Phasendrehung	deg	48	48
Masse	g	800	700

Tabelle 2-1: Entwicklungsziele

3 RÖHRENKONZEPT

3.1 Wendelsystem

Im Laufe des Projektes zeigte sich, dass man die angestrebten Ziele sowohl beim Wirkungsgrad als auch bei der Linearität im Wesentlichen über Modifikationen des Wendelsystems erreicht. Daher soll auf diesen Punkt ausführlicher eingegangen werden.

3.1.1 Wendel, Wendelträger und Hülle

Die Wendel, die Wendelträger und die Innenoberfläche der Hülle bilden gemeinsam das Wendelsystem. Die Wendel und die Wendelträger sind mittels der Technologie des Heißschrumpfens in die metallische, vakuumdichte Ummantelung, die sogenannte „Hülle“ eingebaut, auf deren Außenseite die Magnete befestigt sind. Dies ist als Querschnitt schematisch in Abbildung 3-1 dargestellt, die Hülle ist im Längsschnitt in Abbildung 3-5 auf Seite 14 zu sehen.

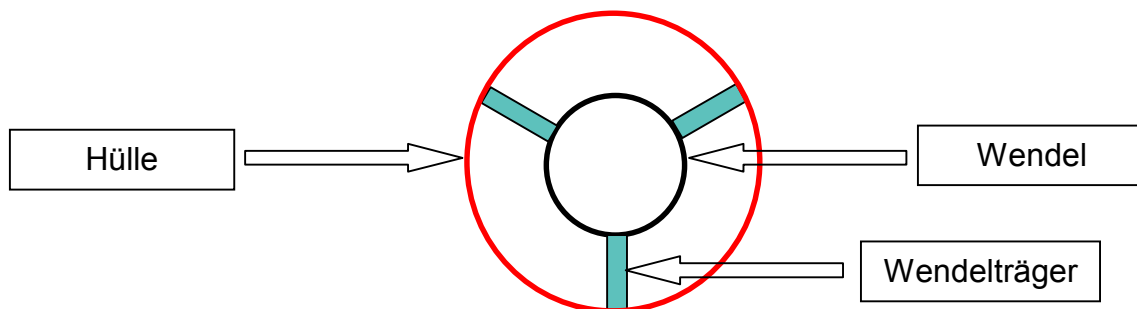


Abbildung 3-1: Wendelsystem, Querschnitt (schematische Darstellung)

3.1.1.1 Wendel

Die Wendel bildet als Verzögerungsleitung für die HF-Welle das Kernstück der Wanderfeldröhre für die Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und Welle.

Die Geometrie der Wendel wird mit den folgenden Parametern charakterisiert:

- Form des Drahtquerschnitts (rund / rechteckig)
- Abmessungen des Drahtquerschnittes (Durchmesser / Breite, Höhe)
- Innen- und Außendurchmesser der Wendel
- Steigung der Wendel, .
das gesamte Steigungsprofil einer Wendel wird üblicherweise mit dem Begriff „Taper“ bezeichnet.
- Gesamtlänge

3.1.1.2 Wendelträger

Die Wendelträger in der Form von langen dünnen Stäben haben die Funktion der dielektrische Abstützung der Wendel gegen die Hülle. Außerdem leiten die Wendelträger die Verlustleistung zur Hülle ab und schützen die Wendel dadurch vor Überhitzung. Eine weitere Funktion besteht darin, dass die Wendelträger die HF-Dämpfung in der Mitte der Röhre übernehmen, um die HF-Reflexionen jeweils an den Enden der Eingangs- und Ausgangs-

wendel zu minimieren. Dazu sind die Wendelträger an jeweils einem Ende mit einer sehr dünnen, leitenden Kohlenstoffschicht versehen.

3.1.2 Änderung von Wendeldurchmesser, Wendelträgerhöhe und Hüllennendurchmesser

Bei der Variante 1 erhöhte sich beim neuen Design der 120 W Röhre die Höhe des Wendelträgers. Im gleichen Maße verringerte sich der Wendeldurchmesser. Daran angepasst verringerte sich auch der Durchmesser des Wendeldrahtes. Wegen der synchronen Änderung von Wendelträgerhöhe und Wendelaußendurchmesser war es möglich, zunächst den bisherigen Innendurchmesser der Hülle beizubehalten.

Bei der Variante 2 verringerte sich der Innendurchmesser der Hülle im gleichen Maße wie der Außendurchmesser der Wendel so dass der ursprüngliche Wendelträger wieder zum Einsatz kam.

Dies ist in der folgenden Abbildung 3-2 schematisch dargestellt. Der Hüllendurchmesser der jeweils anderen Variante ist dabei zur Verdeutlichung gestrichelt eingetragen.

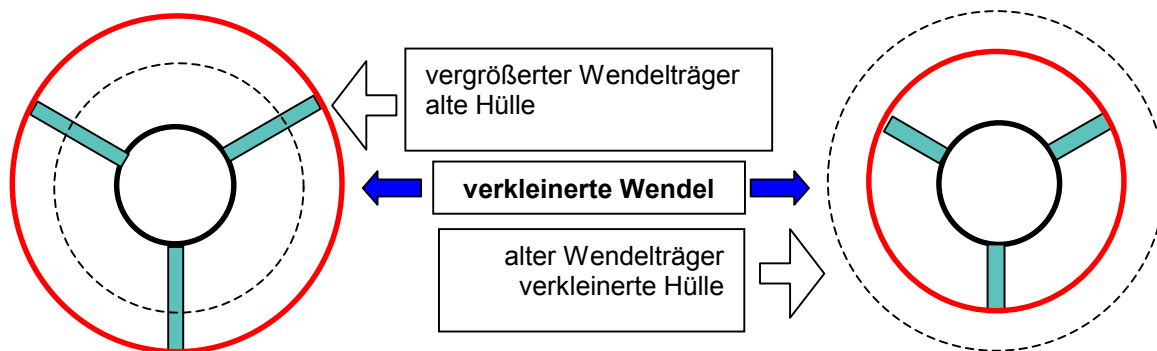


Abbildung 3-2: Wendelsystem Variante 1 und 2 (schematische Darstellung)

Die Variante 2 erwies sich als vorteilhaft und kam auch bei den weiteren Röhren für 65 W und 125 W zum Einsatz. Der Wirkungsgrad erreichte höhere Werte als bei Variante 1, die Wendelträger haben eine höhere mechanische Stabilität und einen geringeren Wärmewiderstand.

Mit der Designänderung des verringerten Wendeldurchmessers gelang der Durchbruch bei der Wirkungsgradverbesserung auf 69 % bei 65 W und 68 % bei 125 W. Gleichzeitig verringerte sich auch die Kompression auf den als Projektziel genannten Wert von weniger als 7,5 dB.

3.1.3 Änderung der Wendelgesamtlänge

Der Einfluss der Wendelgesamtlänge auf den Wirkungsgrad zeigte sich bei einem Versuch, bei dem zwei in diesem Parameter unterschiedliche Röhren berechnet und gebaut wurden. Die Wendellänge überträgt sich 1:1 auf die Röhrenlänge, so dass sich die Masse der Röhre bei längerer Wendel erhöht. Eine Zunahme der Röhrenmasse steht allerdings im Widerspruch zum zweiten Ziel dieses Projektes.

Die Ergebnisse der Wendelberechnung waren für beide Längen in etwa gleich. Dennoch erhoffte man sich eine weitere Wirkungsgradsteigerung bei der längeren Röhre, da diese mit einer höheren Wendelspannung arbeitet und bei der höheren Wendelspannung der erforderliche Kathodenstrom sinkt und damit die Fokussierung einfacher und effektiver wird.

Es ergibt sich mit der Erhöhung der Wendelspannung noch ein weiterer wichtiger Unterschied: Der niedrige Kathodenstrom führt auch zu kleineren Werten der Anodenspannung und somit zu geringeren Feldstärken in der Kanone. Dieser Aspekt wird im Kapitel zur Kanone (Abschnitt 3.5, Seite 17) nochmals aufgegriffen.

Die quantitative Auswirkung des Effekts der Fokussierung auf den Wirkungsgrad kann nur experimentell an aufgebauten Röhren ermittelt werden. Daher war es erforderlich, beide Röhren aufzubauen.

Die Ergebnisse der Wendelberechnung sind in der Tabelle 3-1 zusammengefasst:

	Kurze Wendel	Lange Wendel im Vergleich zur kurzen Wendel
Länge der Röhre	380 mm	+ 20 mm
Masse der Röhre	760 g	+ 40 g
Wendelspannung	3100 V	+ 400 V
Kathodenstrom	55 mA	- 5 mA
Strahlwirkungsgrad	37.9 %	+ 0.7 %
Gesamtwirkungsgrad	65 %	gleich
Phasendrehung	45 °	+ 2.7 °
Kompression	5.7 dB	- 0.4 dB

Tabelle 3-1: Wendelsimulation für kurze / lange Wendel

Wie im späteren Abschnitt (4.2.1.2, Seite 23) über Messergebnisse berichtet wird, war der Wirkungsgrad der Röhre mit der langen Wendel tatsächlich deutlich besser als bei der kurzen Wendel, so dass der Nachteil der höheren Masse mehr als aufgewogen wurde.

Vergleich der Röhren TL4062E/901 und TL4062E/902

Die Röhren 901 und 902 können anhand der folgenden Richtwerte für Satelliten miteinander verglichen werden:

Preis für die Reduzierung	von Verlustleistung:	5 500 € pro Watt
	von Masse	55 000 € pro kg

Bei 60 W Ausgangsleistung ergibt sich für die Röhren 901 und 902 bei mittleren Wirkungsgraden von 65,5 % bzw. 62,5 % (bei 49 ° Phasendrehung) jeweils eine Verlustleistung von 91,6 W bzw. 96 W. Der Unterschied beträgt 4,4 W, was mit obigem Faktor 24 200 € entspricht.

Der Masseunterschied zwischen den Röhren 901 und 902 beträgt etwa 40 g, was mit obigem Faktor 2 200 € entspricht.

Der Preisunterschied von ungefähr einem Faktor 10 zwischen Wirkungsgradvorteil und Massevorteil bei den Röhren 901 und 902 führt die Bedeutung der Wirkungsgradsteigerung nochmals drastisch vor Augen.

Anders betrachtet wird der Wirkungsgradunterschied von 3 % erst durch einen Masseunterschied von 24 200 € / 55 € pro g = 440 g in den Kosten kompensiert.

Zwei Konsequenzen lassen sich daraus ableiten:

- Eine nochmals vergrößerte Röhrenlänge und dadurch höhere Masse ist vertretbar, wenn dadurch eine weitere Wirkungsgradsteigerung ermöglicht wird.
- Bei Röhren mit „hoher Leistung“ sind nochmals größere Röhrenlängen zur Erreichung höherer Wirkungsgrade vertretbar wie bei Röhren mit „niedriger Leistung“. Zum Beispiel ergibt 1 % Wirkungsgradverbesserung (von 65 auf 66 %) bei einer 60 W Röhre eine Leistungseinsparung von 1,4 W, bei einer 120 W Röhre jedoch eine Leistungseinsparung von bereits 2,8 W.

3.1.4 Änderung des Wendeltapers

Die Änderung des Wendeltapers ist die einfachste und daher beliebteste Modifikation des Wendelsystems.

Schon allein die Berechnung der Wendel erzeugt schnell neue HF-Simulationsdaten für Ausgangsleistung, Verstärkung und Linearität über einem gewünschten Frequenzbereich. Die dazu notwendigen Basisdaten, die Parameter für das HF-Verhalten der Wendel, sind aus früheren Messungen bereits vorhanden. Dies sind die Phasengeschwindigkeit der HF-Welle entlang der Wendel und der Koppelwiderstand zwischen Elektronenstrahl und Welle. Bei Durchmesseränderungen werden diese Parameter mit besonderen Messungen neu ermittelt.

Auch technologisch erfordert eine Änderung des Tapers keinen Aufwand an neuen Werkzeugen und Vorrichtungen zur Herstellung von Wendel und Wendelsystem. Das Wickeln der Wendel mit einem neuen Taper erfolgt durch einfache Anpassung des Computerprogramms an die neuen Steigungsprofile.

Aus diesen Gründen kam die Modifikation des Tapers auch in diesem Projekt zur Verbesserung der Röhreneigenschaften mehrfach zur Anwendung.

3.1.4.1 Neuer Wendeltaper für 80 W Ausgangsleistung

Im Leistungsbereich von 80 W HF-Ausgangsleistung lag zu Beginn des Projektes der Wirkungsgrad bei nur 57 %. Dieser Wert ist so niedrig, dass hier nicht nur von einer Wirkungsgradverbesserung gesprochen werden kann. Es handelt sich um das Füllen einer Marktlücke im Bereich zwischen 65 W und 125 W.

Da hier Neuland betreten wurde, kam für den ersten Versuch nur eine Modifikation des Tapers in Frage.

Es konnten auf Anhieb die hohen Wirkungsgrade der alten 65 W Röhre mit etwa 65 % erreicht werden, allerdings auch verbunden mit der hohen Kompression von bis zu 10 dB.

3.1.4.2 Neuer Wendeltaper zur Anpassung an eine Änderung der Kanone

Bei der oben geschilderten 80 W Röhre sollte eine Änderung der Kanone eine verringerte elektrostatische Feldstärke innerhalb der Kanone und damit eine höhere Zuverlässigkeit der Hochspannungsfestigkeit bewirken. Dadurch änderte sich jedoch auch die Optik für den Elektronenstrahl, der nun mit etwas größerem Durchmesser in die Wendel eintrat.

Bei einer ersten, mit dieser Kanone aufgebauten Röhre verschlechterte sich der Wirkungsgrad erheblich.

Die veränderte Wechselwirkung zwischen Strahl und Welle wurde in einer Nachsimulation dieser Röhre ermittelt und in eine neue Berechnung eines modifizierten Wendeltapers mit einbezogen.

Die so aufgebaute neue Röhre (mit neuer Kanone) erreichte wieder die guten Wirkungsgrade der ursprünglichen Röhre (mit alter Kanone).

3.1.4.3 Neuer Wendeltaper zur Verbesserung der Linearität (Phase, Kompression)

Die erste gebaute Röhre mit 65 W und verkleinerter Wendel erreichte die bisher besten Wirkungsgrade mit einzelnen Werten bis 69% (siehe Abschnitt 3.1.2, Seite 6). Damit verbunden war allerdings eine Phasendrehung von deutlich über 50° bei der Frequenz von 4.2 GHz. Das Ziel war eine Phasendrehung von maximal 48°. Auf der Basis der Nachsimulation dieser Röhre wurde daher eine neue Wendel berechnet, die den guten Wirkungsgrad mit einer niedrigen Phasendrehung kombinieren sollte.

Ein weiteres Ziel der neuen Wendel war es, die Änderung der Kompression über der Frequenz zu verringern. Der bisherige Wert von 1.2 dB Änderung über einem Frequenzbereich von 300 MHz sollte auf mindestens unter 1 dB, möglichst sogar unter 0.8 dB absinken. Der Grund dafür liegt bei der Linearisierung der Röhre. Hohe Kompressionsänderungen über der Frequenz können vom Linearisierer nur sehr schwierig kompensiert werden.

Die Ergebnisse der gebauten Röhre zeigten zwar die Verbesserung bei der Phase, bei der Kompression lag der neue Wert mit 1.0 dB jedoch oberhalb der angestrebten Grenze.

3.1.4.4 Neuer Wendeltaper zur Verbesserung von k_t

Bei den 65 W und 125 W Röhren die auf dem neuen Wendelkonzept beruhen, wurden neben hohen Wirkungsgraden auch ungewöhnlich hohe Werte für k_t gemessen. Der Parameter k_t ist der „AM-PM Transfer Koeffizient“. Beim Betrieb der Röhre mit zwei gleichzeitig anstehenden Trägern beschreibt er die Änderung der Phasendrehung des einen Trägers (der konstante Eingangsleistung hat) verursacht durch die „Amplitudenänderung um 1 dB“ eines zweiten Trägers. Die Einheit von k_t ist °/dB.

Die gemessenen Werte von k_t liegen bei < 12 °/dB, die angestrebten Werte liegen bei < 8 °/dB. Dieses Ziel ist durch die Linearisierbarkeit der Röhre vorgegeben.

Der Parameter k_t war in der Vergangenheit nie eine Randbedingung für die Dimensionierung der Röhre, da er bei den bisherigen Wendelkonzepten „automatisch“ in der erforderlichen Größenordnung lag. k_t kam im Berechnungsprogramm für die Wendel bisher nicht vor. Daher musste nun ein Ansatz gefunden werden um k_t rechnerisch zu erfassen. Es gelang, zum Teil mit Hilfe von Literaturstudien, die Abhängigkeit des Parameters k_t von der Phasendrehung und von der Kompression mathematisch zu beschreiben.

Das Berechnungsprogramm für die Wendel erhielt ein neues Modul zur Ermittlung von k_t . Die Werte von k_t konnten damit zunächst für bereits vorhandene Röhren mit brauchbarer Genauigkeit nachsimuliert werden. Die dabei erhaltenen Werte zeigten ausreichende Genauigkeit, so dass es möglich war, eine neue Wendel mit verbessertem k_t zu berechnen und damit eine Röhre zu bauen.

Die Messergebnisse der gebauten Röhre bestätigen eine k_t -Verbesserung. Diese liegt mit 9 °/dB allerdings noch etwas oberhalb der angestrebten Grenze von 8 °/dB. Zusätzlich fällt der Wirkungsgrad um etwa 2 % ab. Zu diesem Parameter besteht daher noch weiterer Handlungsbedarf.

3.1.5 Änderung von Wendellänge, Wendelträgerbekohlungslänge und Wendelinnendurchmesser zur Verbesserung des BWO Verhaltens

Bei der 125 W Röhre mit verringertem Wendeldurchmesser wurde erstmals bei 4 GHz Röhren überhaupt ein Anschwingen bei Rückwärtswellen festgestellt.

Wie der Name sagt, läuft diese Welle rückwärts, d. h. innerhalb der Röhre vom HF- Ausgang zum HF- Eingang. Die gebräuchliche, aus dem englischen Begriff abgeleitete Abkürzung für die Rückwärtswellenschwingung ist „BWO“, für „backward wave oscillation“.

Obwohl die Frequenz der BWO, weit weg vom der Grundwelle, oberhalb von 12 GHz liegt, muss das Auftreten einer BWO unbedingt unterbunden werden. Die Welle tritt am HF-Eingang aus und führt zu Störungen in dem der Röhre vorgeschalteten Bauteil (Linearisierer oder Vorverstärker). Außerdem beeinflusst die BWO auch die Grundwelle innerhalb der Röhre indem sie deren Verstärkung und Linearität massiv und zeitlich nicht konstant beeinflusst und hohe, ebenfalls zeitlich schwankende Wendelströme verursacht.

Die Wahrscheinlichkeit, dass BWOs auftreten hängt von folgenden Faktoren ab:

1. Höhe des Kathodenstroms I_k , Durchmesser des Strahls
Der Durchmesser des Elektronenstrahles vergrößert sich mit zunehmendem Strahlstrom (I_k). Die Elektronen laufen dann in kleinerem Abstand zur Wendel. Hauptsächlich mit diesen wendelnahen Elektronen tritt die Rückwärtswelle in Wechselwirkung. Der höhere I_k erhöht somit den Verstärkungswert für die Rückwärtswelle und damit einen der Faktoren der Rückkoppelschleife, welche die selbständige Schwingung ermöglicht. Mit steigendem Kathodenstrom I_k steigt die Wahrscheinlichkeit, dass BWOs auftreten. Auch ein schwächeres Magnetsystem ergibt einen größeren Strahldurchmesser und verschlechtert das BWO Verhalten.
2. Länge der Eingangs- und Ausgangswendel
Eine vergrößerte Länge der Wendeln erhöht ebenfalls, wie der steigende I_k , den Verstärkungswert für die Rückwärtswelle und begünstigt das Anschwingen bei ansonsten unveränderten Randbedingungen.
3. Dämpfung der Rückwärtswelle
Der Verstärkungswert für die Rückwärtswelle wird durch dämpfende Eigenschaften der Wendel und der Wendelträger abgesenkt. Bei höherer Dämpfung wird die Gefahr, dass BWOs auftreten verringert.

Die Kriterien, nach denen BWOs auftreten, sind gleichzeitig die Grundlage für Maßnahmen, um BWOs zu verhindern.

Drei Röhren für 125 W enthalten daher die im Folgenden beschriebenen Designänderungen:

3.1.5.1 Verkürzte Eingangswendel

Bei einer 125 W Röhre wurde die Eingangswendel gekürzt (und um den gleichen Betrag auch die Eingangshülle) (s.o. Pkt. 2).

Außer der Verringerung des Auftretens von BWO ist bei der Kürzung der Eingangswendel der Einfluss auf die anderen HF-Eigenschaften der Röhre gering. Es ist nur mit einer Abnahme der Verstärkung der Grundwelle zu rechnen. Bisher war die Verstärkung eher zu hoch, so dass für diese Maßnahme genügend Reserven vorhanden sind.

3.1.5.2 Verlängerte Mittendämpfschicht (erhöhte Wendelträgerbekohlungslänge)

Bei einer 125 W Röhre wurde die Dämpfung auf einem der Wendelträger in der Ausgangshülle erhöht (s.o. Pkt.3).

Außer der Verringerung der BWO ist bei einer Änderung in der Ausgangshülle mit weiteren Einflüssen auf die HF-Eigenschaften der Röhre zu rechnen. Zusätzlich zu einer Abnahme der Verstärkung können sich auch Nichtlinearitäten wie Kompression oder Phase ändern. Diese Änderungen sind über Simulationsberechnungen aufgrund der unzureichenden Berechnungsgenauigkeit nicht vorhersehbar und müssen mit der Versuchsröhre ermittelt werden. Das BWO Verhalten der gebauten Röhre verbesserte sich mit dieser Maßnahme leider nicht.

3.1.5.3 Änderung der Verkopplungsbedingungen über die Wendellänge

Die Maßnahme, die bei einer weiteren 125 W Röhre ergriffen wurde, um BWOs zu verhindern, ist dem Vorbild bei den Röhren der Frequenzbereiche Ku- und Ku-Band (12 und 20 GHz) nachempfunden.

Die Wendeln der Eingangs- und der Ausgangshüllen erhalten jeweils eine über der Länge sich ändernde Verkopplung mit dem Elektronenstrahl.

Für jedes Teilstück der Wendel ändert sich dabei die Frequenz der Rückwärtswelle. Die Verstärkung der Rückwärtswelle mit einer konstanten Frequenz reduziert sich auf die Länge der Wendelteilstücke und damit auch die Gefahr des Anschwingens (s.o. Pkt. 2).

Die Wendelsteigung wird in den Teilstücken mit der geänderten Verkopplung, auf die richtige Phasengeschwindigkeit mit Hilfe von Simulationsrechnungen angepasst.

Bei dieser Art der Vermeidung von BWO erhöht sich der Aufwand für die Herstellung der Wendeln deutlich. Erst wenn die anderen Maßnahmen nicht ausreichen, wird darauf zurückgegriffen. In der momentanen Entwicklungsphase wurden die verschiedenen Methoden aus Zeitgründen parallel durchgeführt.

Ergebnis: Das BWO Verhalten verbesserte sich: es konnten keine BWO mehr festgestellt werden. Die Röhre verlor jedoch deutlich an Wirkungsgrad. Hier besteht wie im Falle der kt-Verbesserung (siehe 3.1.4.4, Seite 9) noch weiterer Handlungsbedarf.

3.1.6 Zusammenfassung zum Wendelsystem

Die Änderung des Wendelsystems erfolgte bei den neuen C-Band Röhren in verschiedenen Schritten. Davon waren die wichtigsten:

- bei der 80 W Röhre änderte sich nur der Wendeltaper,
- bei den 65 W und 125 W Röhren änderte sich außer dem Wendeltaper auch der Durchmesser der Wendel.

Die alleinige Änderung des Wendeltapers bei der 80 W Röhre bewirkte zwar eine Wirkungsgraderhöhung, jedoch keine Absenkung der Kompression.

Dagegen verbesserten sich beide Parameter bei den 65 W und 125 W Röhren mit der zusätzlichen Durchmesseränderung der Wendel.

3.2 HF-Ankopplung

Das Ziel der durchgeführten Maßnahmen an der HF-Ankopplung ist eine verbesserte Breitbandigkeit, um die Röhren ohne großen Einstellaufwand innerhalb des gesamten C-Band Bereichs anpassen zu können. Die zwei Maßnahmen, die dazu ergriffen wurden sind die Anpassungsblende und der Anpassungstaper.

3.2.1 Anpassungsblende

Zur Erhöhung der Bandbreite der HF-Anpassung wurde, wie bereits in [1] geschildert, eine Anpassungsblende entwickelt, die aufgrund ihrer Form auch Fingerblende genannt wird. Sie kompensiert den Impedanzsprung beim Übergang von der Wendel zur Ankopplung.

Für die Verbesserung der HF-Anpassung ist die Wirkung der Anpassungsblende von entscheidender Bedeutung. Wie in einem Beispiel in Abbildung 3-3 zu sehen ist, erhöhte sich die Bandbreite von 300 MHz auf 600 MHz bei einem Grenzwert für das „Return Loss“ von 20 dB. Dieser Wert des Return Loss entspricht einem Wellenreflektionsfaktor (VSWR) von 1,2:1 und einer reflektierten Leistung von nur noch 1 %.

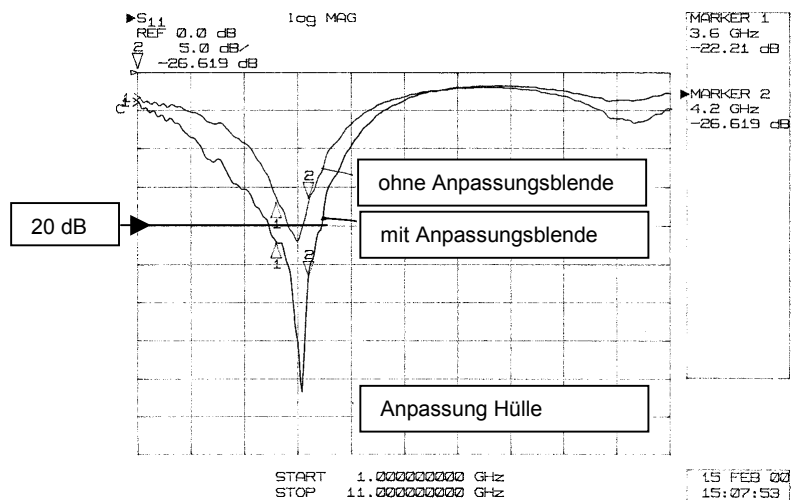


Abbildung 3-3: HF-Anpassung mit und ohne Anpassungsblende (Beispiel)

Die Modifikationen der Anpassungsblende erfolgten für verschiedene Parameter:

Modifikationen für die Eingangshülle, für die verkleinerte Wendel und beim Fingerquerschnitt.

3.2.1.1 Modifikation für die Eingangshülle

Die Anpassungsblende kam bisher nur in der Ausgangshülle zum Einsatz. Es wurden nun Schritte unternommen um eine modifizierte Anpassungsblende auch in die Eingangshülle einsetzen zu können.

Eine Prinzipskizze der Anpassungsblende ist in Abbildung 3-4 unten gezeigt

Mechanische Dimensionierung:

Die Geometrie der Anpassungsblende für die Eingangshülle hat sich gegenüber der Anpassungsblende für die Ausgangshülle bezüglich der Technologie der Befestigung grundlegend geändert. Dies liegt daran, dass die Eingangshülle die Schnittstelle zur Kanone, die Ausgangshülle die Schnittstelle zum Kollektor bildet. Genau an diesen Schnittstellen liegt jeweils die Anpassungsblende; sie muss in ihrer Befestigungstechnik an diese Schnittstelle angepasst werden.

Während die Anpassungsblende der Ausgangshülle aus einem Teil hergestellt werden kann, erfordert die Geometrie der Eingangshülle eine Anpassungsblende, die aus drei Teilen verschiedener Materialien hergestellt ist.

Für dieses kompliziertere Teil wurden Abmessungen, Materialien sowie die Verbindung der Einzelteile durch eine Hochtemperatlötung definiert. Außerdem war es erforderlich für den Einbau in die Eingangshülle entsprechende Lehren zu entwerfen, die eine exakte Positionierung der Anpassungsblende gewährleisten. Die Befestigung erfolgt durch Laserstrahlschweißen.

Elektrische Dimensionierung:

Durch die unterschiedliche Hüllengeometrie gegenüber der Ausgangshülle ergab sich ein weiterer Freiheitsgrad bezüglich der elektrischen Dimensionierung der Anpassungsblende. Dies ist der Abstand des sogenannten Bodens der Blende zum Wendelbeginn. Da sich dessen Wirkung rechnerisch nicht erfassen lässt, wurden mit einem Sortiment an verschiedenen ausgeführten Anpassungsblenden Messungen durchgeführt. Auch mit mehreren bauglei-

chen Hüllen wurden Messungen durchgeführt, um Streuungen von statistischen Aufbauschwankungen zu ermitteln.

3.2.1.2 Modifikationen für die verkleinerte Wendel

Die Abmessungen der Anpassungsblende für die verkleinerte Wendel sind, soweit es die Durchmesser der Wendel betrifft, von der neuen Wendel selbst und von den Abmessungen der neuen Hülle vorgegeben. Hierbei war eine Skalierung ausgehend von der bisherigen Anpassungsblende, möglich. Für die beiden Varianten 1 und 2 der verkleinerten Wendel sind somit auch verschiedene Anpassungsblenden erforderlich.

Zur Ermittlung der optimale Fingerlänge, welche die beste HF-Anpassung ergibt, waren jedoch Versuche mit Blenden verschiedener Fingerlänge erforderlich.

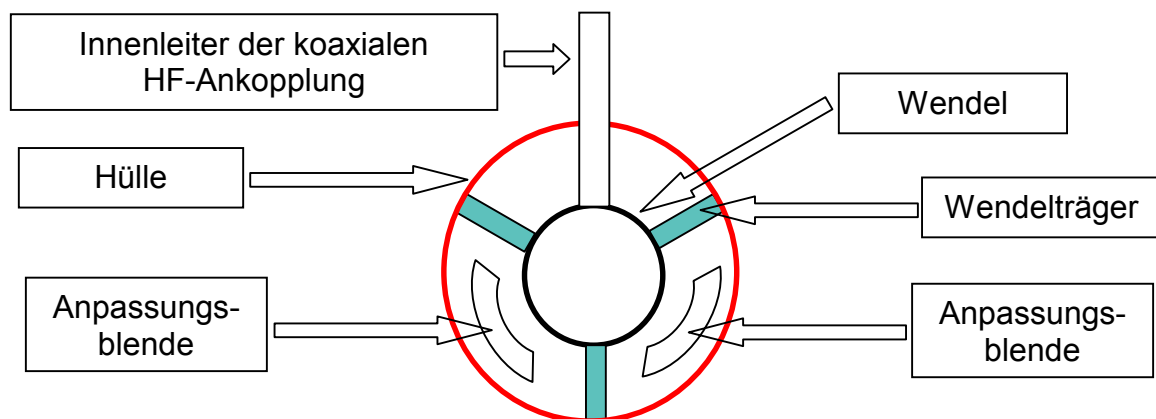


Abbildung 3-4: Prinzipskizze zur Anpassungsblende

3.2.1.3 Modifikationen beim Fingerquerschnitt

Mit der erfolgreich eingeführten Anpassungsblende für die verkleinerte Wendel lässt sich, an der unteren Frequenzecke bei 3.4 GHz, nicht bei allen Röhren die gute Anpassung von 20 dB Return Loss erreichen.

Dies ist durch die Streuungen bei der Herstellung bedingt. Geringe Änderungen der Lage des Wendelendes relativ zur Koaxialleitung können hier zu merklichen Änderungen bei der Anpassung führen. Aufgrund der komplizierten Fertigungsprozesse beim Einbau der Wendel, lassen sich diese Aufbautoleranzen nicht weiter einschränken, ohne dabei einen extremen Mehraufwand zu betreiben.

Es wurde daher versucht, die Anpassung an der unteren Frequenzecke bei 3.4 GHz weiter zu verbessern.

Eine nochmalige Überprüfung und Auswertung der Serienmessungen mit Anpassungsblenden zeigte, dass keine Frequenzverschiebung zu tieferen Frequenzen hin möglich ist.

Erstmalig kam daher nun eine Änderung des Fingerquerschnittes in Betracht.

Messungen mit umfangreichen Fingerblendensortimenten ergaben das erwünschte Ergebnis mit einer Verschiebung der Anpassungsfrequenz zu tieferen Werten.

Außerdem ergab sich nicht nur eine Verschiebung der Frequenz, es erhöhte sich insgesamt die Bandbreite um 50 bis 100 MHz.

3.2.2 Anpassungstaper

Eine weitere Möglichkeit zur Kompensation des Impedanzsprungs beim Übergang von der Wendel zur Ankopplung besteht darin, die Steigungen der letzten Windungen vor der Ankopplung zu verändern.

Parallel zu den Erfahrungen aus dem Ku- und Ka- Band wurde eine Hülle mit einer solchen Wendel aufgebaut. Die Messung ergab eine geringe Verbesserung der HF-Anpassung, die Wendelsimulation jedoch mit der modifizierten Wendel einen schlechteren Wirkungsgrad. Eine Einführung ist somit nicht vertretbar, falls die Steigung der letzten Windung vor der Ankopplung erst nachträglich modifiziert wird.

Bei den neuen Wendeln mit verkleinertem Durchmesser ist der Anpassungstaper von Anfang an in die Wendelberechnung einbezogen. Die Auswirkungen auf Wirkungsgrad und Nichtlinearitäten werden von anderen Längenbereichen der Wendel mit entsprechenden Steigungen kompensiert.

Überraschend ergaben die Messungen, dass der Anpassungstaper zwar bei der Ausgangshülle eine Verbesserung der Bandbreite von 150 MHz bewirkt, nicht jedoch bei der Eingangshülle. Bei der Eingangshülle zeigte sich eher eine geringe Verschlechterung.

Für dieses Verhalten lässt sich eine Erklärung im Taper der Wendeln finden. Während die Eingangswendel nur wenig Steigungsänderungen aufweist, sind die Steigungsänderungen der Ausgangswendeln wesentlich größer, vor allem in der Nähe der Ankopplung. Der Anpassungstapers kompensiert den Einfluss der Steigungsänderungen auf die HF-Anpassung.

3.3 Magnetsystem

3.3.1 Geometrie von Magneten und Polschuhen

Wie im Abschnitt 3.1 Wendelsystem (Seite 5) geschildert ist, ändert sich bei der Variante 2 der verkleinerten Wendel auch der Hülleninnendurchmesser. Infolgedessen ändern sich auch die Verhältnisse für das Magnetsystem, weil von der Durchmesseränderung die magnetischen Polschuhe betroffen sind. Dies ist in Abbildung 3-5 als schematisches Bild der Hülle zusammen mit dem Magnetsystem dargestellt.

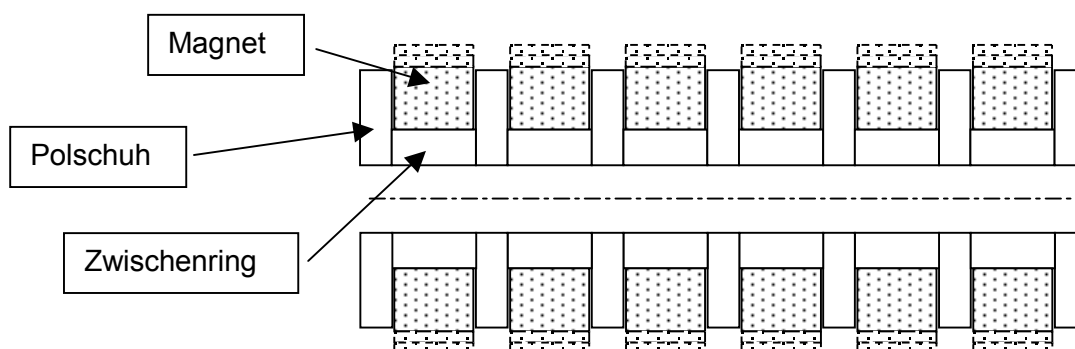


Abbildung 3-5: Hülle mit Magnetsystem (3 verschiedene Magnetdurchmesser)

Zusätzlich kamen auch die neuen, durch einen kleineren Außendurchmesser massereduzierten Magnete zum Einsatz, die bereits in [1] erwähnt sind. Die 125 W Röhre wiederum erfordert, bedingt durch das hohe Magnetsystemfeld, Magnete mit erhöhtem Außendurchmesser.

Eine Versuchsreihe sollte Aufschluss über den optimalen Außendurchmesser der Polschuhe geben, mit dem das größtmögliche Magnetfeld auf der Achse, d.h. im Bereich des zu fokussierenden Elektronenstrahls, erzielt wird.

Der Versuch beinhaltete somit drei verschiedene Magnet-Außendurchmesser. Der ermittelte optimale Polschuh-Außendurchmesser lag für jeden Magnet-Außendurchmesser bei einem anderen Wert so dass der ausgewählte Polschuh-Außendurchmesser für die neu zu bauenden Röhren einen Kompromiss aus den ermittelten Werten darstellt.

3.3.2 Feldstärke des Magnetsystems

Die Feldstärke des Magnetsystems ist die letzte verbleibende Komponente der Röhre, die nach dem Pumpen noch geändert werden kann und die gleichzeitig einen erheblichen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der Röhre hat.

Die Möglichkeit der Magnetsystemänderung wurde daher zur Lösung einer Vielzahl von Problemen verwendet. Einige davon sind im Folgenden exemplarisch aufgelistet:

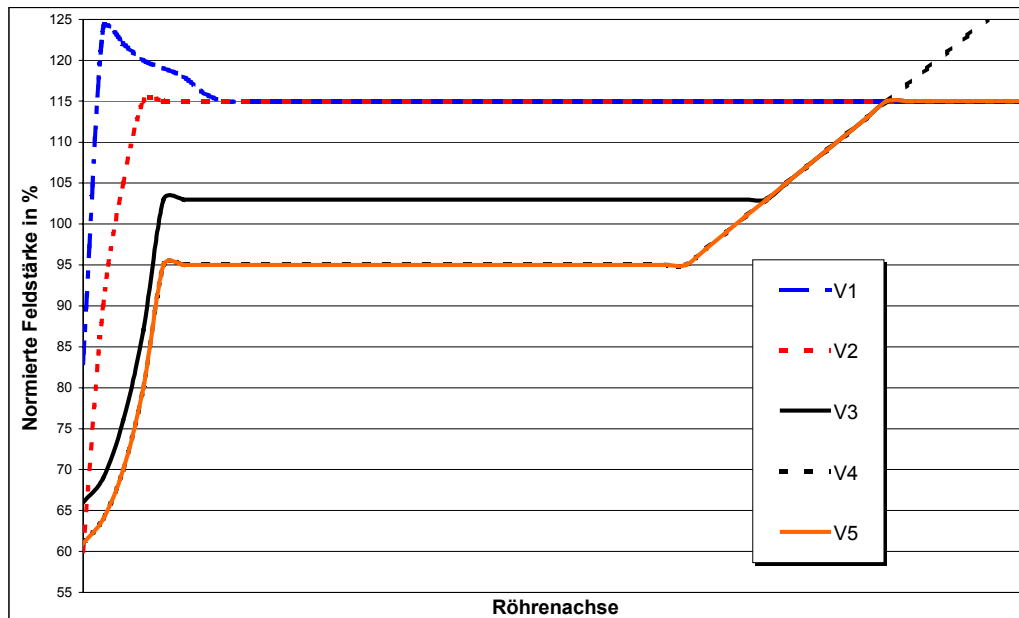


Abbildung 3-6: Beispiel für Magnetsystemversuche

- Absenkung von erhöhtem Wendelstrom bei Sättigung oder im „Overdrive“, d.h. bei Ansteuerung über die Sättigung hinaus.
- Erhöhung oder Absenkung der Verstärkung mittels schwächerer oder stärkerer Magnetsystem Feldstärke.
- Kompensation von Änderungen in der Elektronenoptik der Kanone.
- Verbesserung des Wirkungsgrades. Mit fallender Feldstärke steigt in der Regel der Strahlwirkungsgrad und damit oft auch der Gesamtwirkungsgrad. Gleichzeitig kann sich die Linearität verschlechtern (Phase, Kompression).
- Verbesserung der Linearität: hier gilt der umgekehrte Zusammenhang wie im vorigen Pkt. erläutert.

- Verbesserung des BWO Verhaltens. Mit steigender Feldstärke des Magnetsystems verringert sich der Strahldurchmesser, die BWO Gefahr fällt (siehe Abschnitt 3.1.5 Pkt.1 Seite 9).

In einzelnen Fällen werden große Anstrengungen unternommen, um mit veränderten Feldstärken des Magnetsystems zu guten Eigenschaften der Röhre zu gelangen. Beispielhaft ist in der Abbildung 3-6 ein Fall aufgezeigt, bei dem insgesamt sechs verschiedene Magnetsystemvarianten überprüft, d. h. fokussiert und gemessen wurden. Die Optimierung erfolgte aufgrund von Simulationsrechnungen für den Strahlverlauf und aufgrund der Ergebnisse des jeweils vorangegangenen Versuches. Es zeigte sich, dass nicht immer die bei der Berechnung als optimal hervorgehende Variante auch auf der Röhre die besten Ergebnisse bewirkt. Die Änderungen der Feldstärke des Magnetsystems können in drei Bereiche aufgeteilt werden:

- „Kanonenbereich“, d. h. die Magnete auf der Eingangshülle in der Nähe der Kanone,
- „Mittelteil“ und
- „Kollektorbereich“, d. h. die Magnete auf der Ausgangshülle in der Nähe des Kollektors.

Der Kanonenbereich hat eine Schlüsselfunktion für den weiteren Verlauf des Elektronenstrahles. Er muss stark im Zusammenwirken mit der Elektronenoptik der Kanone betrachtet werden.

Im Mittelteil werden hauptsächlich der Strahlwirkungsgrad, die Verstärkung und das BWO Verhalten beeinflusst.

Der Kollektorbereich ist im Wesentlichen für den Wendelstrom bei Sättigung und im Overdrive verantwortlich.

3.4 Kollektor

3.4.1 Eintrittsdurchmesser der Stufe 1

Die Verwendung der verkleinerten Wendel erfordert automatisch auch eine Absenkung des Durchmessers beim Elektronenstrahl, der die Wendel in ihrem Inneren durchläuft. Nach dem Verlassen der Wendel tritt der Strahl in die erste Stufe des Kollektors ein.

Dies legt den Versuch nahe, auch den Eintrittsdurchmesser der ersten Stufe des Kollektors im Durchmesser abzusenken. Der Vorteil dieser Änderung besteht darin, dass aus dem Kollektor zurücklaufende Elektronen es nicht so leicht haben, wieder zurück in die Wendel zu gelangen. Geschieht dies, dann stören sie die Wechselwirkung der vorwärtslaufenden Welle mit dem Strahl empfindlich. Davon ist besonders die Linearität im Kleinsignalbetrieb betroffen (Phase, Kompression).

Andererseits besteht die Gefahr, dass mit dieser Änderung auch der Eintritt des vorwärtslaufenden Strahles in den Kollektor erschwert ist. Durch die dadurch erschwerte Kollektorfokussierung ist eine Verschlechterung des Wirkungsgrades zu befürchten.

Der Versuch war schließlich erfolgreich, der gute Wirkungsgrad blieb erhalten und der Vorteil von weniger zurückfließenden Elektronen konnte genutzt werden.

3.4.2 Fünfstufiger Kollektor

Wie auch in den anderen Frequenzbändern wie im Ku- oder Ka-Band, ist auch im C-Band die Erhöhung der Anzahl der Kollektorstufen von bisher vier auf fünf Stufen eine Möglichkeit der Wirkungsgradverbesserung. Die Erhöhung der Stufenzahl ist jedoch mit beträchtlichem technologischen Aufwand verbunden, da neben der Elektronenoptik auch die Gestaltung der Hochspannungsdurchführungen betroffen ist. Diese haben einen maßgeblichen Anteil an

der Zuverlässigkeit der Röhren und müssen mit viel Sorgfalt ausgelegt werden. Daher sollte, zum Vergleich von Aufwand und Nutzen, das Verbesserungspotential für den fünfstufigen Kollektor zunächst theoretisch ermittelt werden.

Für verschiedene aktuelle C-Band Wendeln wurde die zu erwartende Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades beim Übergang vom vier- zum fünfstufigen Kollektor berechnet.

Für das neue Design mit verringertem Wendeldurchmesser ergab sich ein Wert von 3,3 %.

Basierend auf dieser Berechnung ist ein fünfstufiger Kollektor bei weiteren Überlegungen zur Wirkungsgradsteigerung von großer Bedeutung. Der fünfstufige Kollektor sollte daher in neuen Entwicklungsprojekten bearbeitet werden.

3.5 Kanone

Auch bei der Kanone spielt die Anpassung an die neue, verkleinerte Wendel die Hauptrolle bei den durchgeführten Modifikationen und Untersuchungen. Betroffen davon sind die Optik für den Elektronenstrahl und die Höhe der auftretenden elektrostatischen Feldstärken in Bezug auf die Hochspannungsfestigkeit. Dies betraf hauptsächlich die 125 W Röhre, es gilt jedoch auch analog für die 80 W Röhre. Bei der 65 W Röhre erfolgten keine Modifikationen der Kanone.

Drei verschiedene Varianten für die Optik des Elektronenstrahls kamen bei der 125 W Röhre zum Einsatz.

Die erste Variante bestand aus einem kompletten Neudesign von Wehnelt und Anode mit dem Ziel, den Durchmesser des Elektronenstrahls abzusenken, im genau gleichen Maße, wie dies bei der Wendel geschah.

Die so gebaute Röhre erforderte jedoch das Anbringen von zusätzlichen, starken Magneten auf der Kanone. Dies war notwendig, um zu einer guten Fokussierung und guten elektrischen Daten wie Wirkungsgrad und Linearität zu gelangen.

Magnetfeldmessungen an einem Dummy und eine auf diesen Messungen beruhende Simulationsberechnung zeigte, welchen den Einfluss die Zusatzmagnete haben. Durch sie vergrößerte sich der Durchmesser des Elektronenstrahles wieder.

Als Variante 2 kam nun eine veränderte Kanone zum Einsatz, deren Elektronenoptik einen Strahl mit etwas größerem Durchmesser erzeugt.

Bei dieser Kanone ergab jedoch eine Untersuchung der Hochspannungsfestigkeit mittels Simulationsrechnungen hohe Werte der elektrostatischen Feldstärken, die nicht akzeptabel waren.

Eine dritte Variante der Kanone, mit nochmals veränderter Anode bildete schließlich den besten Kompromiss zwischen Hochspannungsfestigkeit und Strahldurchmesser. Der Strahldurchmesser vergrößerte sich hierbei nochmals etwas gegenüber der Variante 2.

Die maximal auftretenden elektrischen Feldstärken erweisen sich als limitierende Größe bei der Auslegung der Kanonengeometrie.

Daraus ergeben sich auch Konsequenzen für die Wendelberechnung, wie im Folgenden beschrieben ist.

Die Stelle in der Kanone mit der maximalen Feldstärke ist die Anode. Somit wächst die maximale kritische Feldstärke proportional mit der Anodenspannung an. Die Anodenspannung wiederum errechnet sich nach dem Perveanzgesetz aus der Kanonenperveanz und dem erforderlichen Kathodenstrom:

$P_{Kanone} = \frac{I_{Kathode}}{\sqrt{U_{Anode}}^3}$ $U_{Anode} = \left(\frac{I_{Kathode}}{P_{Kanone}} \right)^{\frac{2}{3}}$	$P_{Kanone} = \text{Kanonenperveanz } [A/V^{2^3}]$ $I_{Kathode} = \text{Kathodenstrom } [A]$ $U_{Anode} = \text{Anodenspannung } [V]$
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Gleichung 3-1: Kanonenperveanz

Bei der Wendelberechnung besteht ein Zusammenhang zwischen Kathodenstrom, Wendelspannung und Strahlwirkungsgrad:

$\eta_{Strahl} = \frac{P_{Sättigung}}{U_{Wendel} \times I_{Kathode}}$	$\eta_{Strahl} = \text{Strahlwirkungsgrad } [\%]$ $P_{Sättigung} = \text{HF-Ausgangsleistung bei Sättigung} [W]$ $U_{Wendel} = \text{Wendelspannung } [V]$ $I_{Kathode} = \text{Kathodenstrom } [A]$
-----------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Gleichung 3-2: Strahlwirkungsgrad

Sollten neue Berechnungen des Wendeltapers zu höheren Kathodenströmen führen, dann ergibt sich daraus bei gleichbleibender Kanonenperveanz eine höhere Anodenspannung.

Die Konsequenz für die Wendelberechnung ist es daher, den Kathodenstrom möglichst niedrig zu halten und mit hoher Wendelspannung und hohem Strahlwirkungsgrad zu arbeiten.

Eine hohe Wendelspannung führt andererseits zu einer größeren Baulänge der Röhre und damit zu einer höheren Masse der Röhre, was im Widerspruch zum zweiten Ziel dieses Projektes steht, der Massereduzierung. Da die elektrische Feldstärke in der Kanone von großer Bedeutung für die Zuverlässigkeit der Röhre ist, muss diesem Aspekt unbedingt Vorrang gegenüber der Gewichtsreduzierung eingeräumt werden.

3.6 Linearisiererverwendbarkeit

Viele Nachrichtenübertragungsketten erfordern höhere Linearität als sie die Röhre allein aufweisen kann. Der Röhre ist daher in diesen Systemen ein Linearisierer vorgeschaltet, eine auf Halbleiterbasis aufgebaute, komplexe Baugruppe.

Die grundsätzliche Funktion des Linearisierers beruht darauf, dass er die Nichtlinearität der Röhre bei Phase und Kompression vorweg nimmt, indem er die gleiche Nichtlinearität mit entgegengesetztem Vorzeichen zur Röhre aufweist. Man spricht hier von Vorverzerrung.

Dadurch kompensiert der Linearisierer zu einem großen Teil die Nichtlinearität der Röhre und das Gesamtsystem erreicht die für die fehlerlose Datenübertragung notwendigen linearen Eigenschaften.

3.6.1 Kompression

Zu Beginn dieses Entwicklungsvorhabens waren die Röhren mit hoher Kompression (bis 10 dB) mit Wirkungsgraden bis 65 % der Stand der Technik. Eine ganze Reihe von Projekten

verwendete diese Röhren. Unsere Kunden entwickelten dazu Linearisierer, mit dem Ziel, besser mit der hohen Kompression der Röhren zurecht zu kommen.

Ein in dieser Hinsicht weiterentwickelter Linearisierer wurde im Rahmen dieses Projekts zusammen mit der Röhre gemessen, um das Potential für hohe Kompressionswerte bei der Neuentwicklung von Wanderfeldröhren auszuloten.

Die erzielten Ergebnisse waren zwar vielversprechend, trotzdem waren noch Verbesserungen beim Linearisierer notwendig, deren Machbarkeit sich nur schwer abschätzen ließ:

- die Kompression kann im Leistungsbereich nahe der Sättigung nicht ganz kompensiert werden. Nach der Linearisierung verbleibt ein Wert von 2.5 dB, das Ziel liegt bei 1.5 dB.
- im Kleinsignalbereich ergibt sich eine Überkompensation bei der Phase von 7° und bei der Kompression von 0,8 dB.

Das Ziel, die Kompression bei der Röhre von bisher maximal 10 dB deutlich abzusenken, musste daher beibehalten werden.

3.6.2 Phase, Kompressionsänderung über der Frequenz

Der Versuch, die Phase und die Kompressionsänderung über der Frequenz zu verbessern, ist im Abschnitt 3.1.4.3 Neuer Wendeltaper zur Verbesserung der Linearität (Phase, Kompression) auf Seite 9 geschildert.

Die Wendel, insbesondere der Wendeltaper, ist die einzige Größe welche die Linearität der Röhre beeinflusst bzw. steuert. An der fertigen, gebauten Röhre kann die Linearität dann nur noch im kleinen Rahmen durch Änderung der Wendelspannung verbessert werden.

3.6.3 Kt

Der Versuch, den AM-PM Transfer Koeffizienten k_t zu verbessern, ist im Abschnitt 3.1.4.4 Neuer Wendeltaper zur Verbesserung von k_t auf Seite 9 geschildert.

Für den Linearisierer spielt nicht nur der Wert von k_t bei der Sättigungsansteuerung der Röhre eine wichtige Rolle, sondern auch der Kurvenverlauf bei Änderung der HF-Ansteuerung von Kleinsignal bis Sättigung. Die Simulationsrechnungen können diese Feinheiten aufgrund ihrer Ungenauigkeit leider nicht vorhersagen. Hier kann nur die gebaute und gemessene Röhre Auskunft geben.

Analog zu den Messungen die oben im Abschnitt 3.6.1 Kompression geschildert sind, wurde auch eine Röhre mit hohem k_t zusammen mit einem Linearisierer gemessen.

Das Ziel, den Wert von k_t von typischerweise $12^\circ/\text{dB}$ auf unter $8^\circ/\text{dB}$ abzusenken gelang nicht ganz. Der erreichte Wert lag bei $9^\circ/\text{dB}$. In der unten gezeigten Abbildung 3-7 ist ein Beispiel einer gemessenen k_t Verbesserung dargestellt.

Es besteht somit weiterer Handlungsbedarf, die Röhren bezüglich k_t zu verbessern.

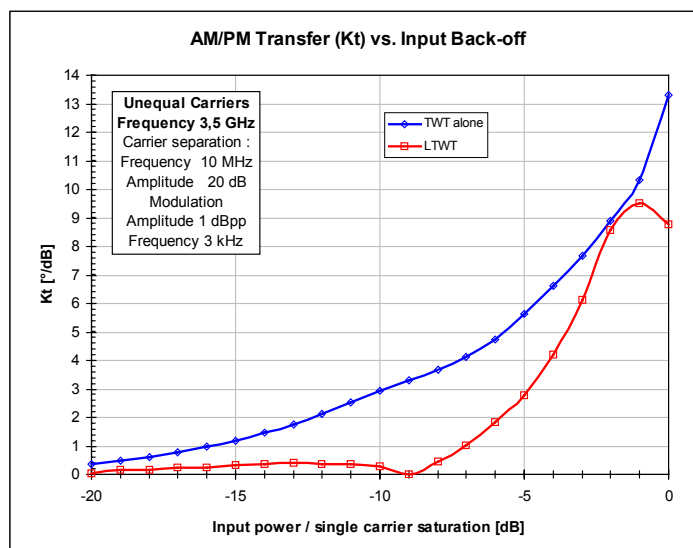


Abbildung 3-7: Beispiel für eine Kt Verbesserung mit Linearisierer (LTWT)

3.7 Gehäuse

Das Gehäuse nimmt verschiedene Aufgaben wahr:

- Übertragung der mechanischen Belastungen von der Röhre auf die Montagefläche.
- Ableitung der Verlustwärme, die in der Röhre erzeugt wird.
- Abschirmung von elektromagnetischer Störstrahlung (von außen nach innen aber auch von innen nach außen).

Auf alle drei Aspekte wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

3.7.1 Mechanische Belastungen

Die neu entwickelten Röhren unterscheiden sich in mechanischer Hinsicht nur unwesentlich von den bisherigen C-Band Röhren der laufenden Fertigung. Dies ergibt sich aus den Beschreibungen des neuen Design in den Abschnitten 3.1 bis 3.5. Das für die neuen Röhren vorgesehene Gehäuse ist entsprechend analog zum bisherigen qualifizierten Standard aufgebaut.

Bezüglich der mechanischen Belastungen gab es daher keine Neuerungen beim Gehäuse.

3.7.2 Thermische Belastungen

Um die thermischen Belastungen abschätzen zu können, war es erforderlich, die von der neuen Röhre erzeugten Verlustleistungen zu ermitteln. Diese Erkenntnisse fließen dann in die Gehäuseabmessungen ein.

Ausgehend von den bekannten 65 W und 125 W C-Band Röhren, mit nicht so gutem Wirkungsgrad, war nun mit einer niedrigeren Verlustleistung zu rechnen. Dabei gab es jedoch eine Ausnahme. Es stellte sich heraus, dass die Röhren mit der verkleinerten Wendel im Overdrive, d.h. oberhalb der Sättigung, mehr Oberwellen erzeugten als die früheren Röhren. Wegen der schlechten HF-Anpassung von etwa 2 dB Return Loss wird etwa 70 % der Oberwellenleistung in die Röhre hinein zurückreflektiert und in der Mittendämpfschicht der

Wendelträger absorbiert (siehe Abschnitt 3.1.1.2 Wendelträger Seite 5). An dieser Stelle muss die Oberwellenverlustleistung durch geeignete Maßnahmen abgeleitet werden um eine Überhitzung von Wendel und Wendelträgern aber auch des Vergussmaterials der Magnete zu verhindern.

Dies geschah dadurch, dass dieser kritischen Bereich ein Vergussmaterial erhielt, das zum einen eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist und zum anderen beständig gegenüber hohen Temperaturen ist. Temperaturmessungen an allen kritischen Stellen der Röhre bestätigten die Wirksamkeit dieser Maßnahme.

Die bisher gebauten 65 W und 125 W Röhren unterscheiden sich in der thermischen Anbindung der Hülle an das Gehäuse:

- Wärmeableitbleche: bei 125 W doppelte Anzahl wie bei 65 W.
- Vergussmaterial: bei 125 W wird das Material mit der höheren Wärmeleitfähigkeit, höheren Temperaturbeständigkeit und jedoch auch höheren Gewicht in einem ausgedehnten Bereich der Hülle wie bei 65 W eingesetzt.

Insgesamt führt die verbesserte Wärmeableitung bei der 125 W Röhre zu einer zusätzlichen Masse von etwa 30 g gegenüber der 65 W Röhre.

Aus den Messungen am thermischen Modell einer 65 W Röhre ergab sich durch Skalieren für die 80 W Röhre, dass zwar die Anzahl der Wärmeableitbleche von der 65 W Röhre ausreichen, jedoch das schwerere Vergussmaterial von der 125 W Röhre erforderlich ist.

Dies konnte mit Temperaturmessungen an der mittlerweile gebauten 80 W Röhre überprüft werden. Die Werte aus der Skalierung des thermischen Modells bestätigten sich dabei erfreulicherweise.

Bis auf die Ausnahme des Oberwellenverhaltens gab es aus thermischen Gründen keinen zwingenden Anlass, das Gehäuse zu ändern. Es bot sich höchstens die Möglichkeit, an Stellen mit verringertem Anfall von Verlustwärme, die Masse des Gehäuses abzusinken. Da dies jedoch ohne Beeinträchtigung der mechanischen Stabilität nicht möglich war, kamen weitere Änderungen am Gehäuse nicht in Betracht.

3.7.3 Elektromagnetische Abschirmung

Zur Verringerung der Auswirkungen von elektromagnetischer Ein- und Abstrahlung auf die Röhre (RS = radiated susceptibility, RE = radiated emission) war am Röhrengehäuse bisher eine Nut angebracht, in der die Ränder des Gehäusedeckes eingreifen. Diese Nut hat den Nachteil, dass das Gehäuse gerade an den Stellen geschwächt wird, an der die Befestigungsglaschen liegen. Diese sind für die mechanische und thermische Anbindung zur Montagefläche wichtig.

Grundsätzliche Verbesserungen in Bezug auf RS und RE sind mittlerweile auch innerhalb des Gehäusedeckels eingeführt. Daher war es sinnvoll, zu prüfen, ob nun auf die Nut verzichtet werden kann. Mehrere Röhren erhielten abwechselnd einen in den Abmessungen verkleinerten Gehäusedeckel und einen normalen Gehäusedeckel montiert. Diese Methode simulierte den Wegfall der Nut bei den nun durchgeführten Messungen von RE und RS.

Es wurden keine Unterschiede zwischen den beiden Varianten gefunden. Die Nut konnte daher entfallen.

3.7.4 Massereduzierung

Neben dem Ziel der Wirkungsgradsteigerung mit der ersten Priorität, bestand das Ziel der Massereduzierung. Der Weg, mit dem dies erreicht werden kann, war bereits von Ku-Band vorgegeben. Dort konnten mit großem Erfolg etwa 100 g pro Röhre an Masse eingespart werden.

Dies gelang mit folgenden Maßnahmen:

- Mini-Gun, Kanone mit stark verringertem Durchmesser.
- Neue Kühlfins an der Hülle in Löttechnik, statt Klemmtechnik.
- Neue Befestigung des Kollektors, ebenfalls in Löttechnik, statt Klemmtechnik

Diese Maßnahmen waren auch im C-Band vorgesehen. Die großen Anstrengungen, die jedoch zur Verbesserung des Wirkungsgrades in drei Leistungsklassen (65, 80 und 125 W) notwendig waren, ließen keinen Freiraum mehr, um auch die Massereduzierung erfolgreich durchzuführen. Ferner sollten die Arbeiten im Ku-Band erst komplett abgeschlossen sein, um darauf aufbauen zu können ohne dass verschiedene Arbeiten doppelt gemacht werden müssen.

Es ist vorgesehen die Massereduzierung innerhalb des nachfolgenden Entwicklungsvorhabens durchzuführen.

4 AUFGEBAUTE RÖHREN

4.1 Übersicht der aufgebauten Röhren

Die im Laufe dieses Entwicklungsvorhabens aufgebauten Wanderfeldröhren sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Als sogenannte Bread Board Röhren (BB) sind die Röhren nicht in ein Gehäuse eingebaut. Ausnahmen bilden nur die Röhren TL4062E,901 und TL4099E,915, die für 65 W und 125 W als EM/Q verwendet wurden.

Die Tabelle ist nach Leistungsklassen gegliedert. Zu jeder Röhre sind außerdem die jeweils eingeführten Neuerungen gegenüber der Vorgängerröhre angegeben.

Leistung	Type TL.....	Röhren-Nr.	Neuerung	Beschreibung im Kapitel 3 (Seite)
65 W	4062E	901	neues Wendelsystem, Variante 2	3.1.2 (6)
		901A	modifizierter Kollektor	3.4.1 (16)
		902	modifizierter Wendeltaper, kürzere Wendeln	3.1.3 (6)
		903	modifizierter Wendeltaper (Phasendrehung)	3.1.4.3 (9)
		904	modifizierter Wendeltaper (kt)	3.1.4.4 (9)
80 W	4098	902	neuer Wendeltaper für 80 W	3.1.4.1 (8)
		903	modifizierte Kanone	3.5
		904	modifizierter Wendeltaper	3.1.4.2 (8)
125 W	4099E	913	neues Wendelsystem, Variante 1, neue Kanone	3.1.2 (6) 3.5 (17)
		914	neues Wendelsystem, Variante 2, modifizierte Kanone	3.1.2 (6) 3.5 (17)
		915	modifizierte Kanone	3.5 (17)
		916	verkürzte Eingangswendel	3.1.5.1 (10)
		917	verlängerte Mittendämpfschicht	3.1.5.2 (10)
		918	Verkopplungsbedingungen	3.1.5.3 (11)

Tabelle 4-1: Übersicht zu hergestellten Röhren und deren Neuerungen

4.2 Ergebnisse der aufgebauten Röhren

4.2.1 Kurzbeschreibungen

4.2.1.1 TL4062E, 901 (neues Wendelsystem, Variante 2), 901A (modifizierter Kollektor)

Das Röhrenkonzept dieser Röhren ist in Kapitel 3 unter 3.1.2, S.6 und , 3.4.1, S.16 beschrieben.

Mit dieser Röhre gelang beim Wirkungsgrad ein Durchbruch für die 65 W C-Band Röhre. In der Spitze wurden für einzelne Frequenzen 69 % erreicht.

Allerdings war damit eine Phasendrehung von deutlich über 50° verbunden, der höchste Wert lag bei bis zu 56°. Das Ziel war eine Phasendrehung bis maximal 48°.

Die Werte für die Kompression sind sehr niedrig. Sie bewegen sich zwischen 4,5 und 6 dB und haben damit deutlich Reserve zum Grenzwert von 8 dB.

Aufgrund dieser guten Werten wird die Röhre als EM/Q für die 65 W Leistungsklasse bei C-Band verwendet und in ein Gehäuse eingebaut. Mit einer niedrig gewählten Wendelspannung erhält man im Frequenzbereich von 3,8 bis 4,2 GHz eine Phasendrehung von maximal 49° und Wirkungsgrade von immer noch 65 bis 66.7%. Bei diesen etwas niedrigeren Wirkungsgraden erzeugt die Röhre mehr Verlustleistung, so dass diese Einstellung als „worst case“ Fall für das EM/Q gut geeignet ist. Der worst case Wert für Kompression beträgt in diesem Fall 6,1 dB bei der höchsten Frequenz von 4,2 GHz.

Das Datenblatt in Abbildung 4-1 (Seite 28) zeigt Messergebnisse der Röhre TL4062E/901.

Obwohl die Röhre 901A mit einem modifizierten Kollektor aufgebaut ist, zeigt sie im wesentlichen die gleichen Ergebnisse wie die Röhre 901.

4.2.1.2 TL4062E, 902 (mod. Wendeltaper, kürzere Wendeln) und Vergleich mit 901

Das Röhrenkonzept dieser Röhre ist in Kapitel 3 unter 3.1.3, S.6 beschrieben.

Die Röhre 902 steht aufgrund der Wendelberechnung im direkten Vergleich zur Röhre 901. Sie wurde mit 20 mm weniger Baulänge dimensioniert, was einer Masseinsparung von etwa 40 g entspricht. Die Voraussage für den Gesamtwirkungsgrad war in etwa die gleiche wie für die Röhre 901.

Die Messergebnisse zeigten jedoch nur Wirkungsgrade von maximal 64,8 % bei einer Phasendrehung von 58 ° und einer Kompression von 6,6 dB. Bei einer Einstellung für 49 ° Phasendrehung fällt der Wirkungsgrad um etwa ein weiteres Prozent auf Werte zwischen 61,2 und 63,8 %.

Der Grund für den unerwarteten Unterschied dürfte im unterschiedlichen Geschwindigkeitsspektrum der Elektronen beim Kollektoreintritt liegen. Bei diesem Parameter hat die Wendelberechnung eine große Unsicherheit.

Das Datenblatt in Abbildung 4-2 (Seite 29) zeigt Messergebnisse der Röhre TL4062E/902.

4.2.1.3 TL4062E,903 (mod. Wendeltaper, Phasendrehung)

Das Röhrenkonzept dieser Röhre ist in Kapitel 3 unter 3.1.4.3, S.9 beschrieben.

Es war Ziel dieser Röhre, einen guten Wirkungsgrad mit niedriger Phase und mit einer kleinen Änderung der Kompression über der Frequenz zu verbinden.

Die Messwerte der Röhre zeigen, dass das Ziel eines guten Wirkungsgrades und niedriger Phase erreicht wurde. Der Wirkungsgrad lag mit knapp 69 % (68.9 %) etwa wie bei der Röhre 901, die Phasendrehung sank auf 47°. Beides beschränkte sich jedoch auf den Frequenzbereich von 3.9 bis 4.2 GHz, in dem das Optimum dieser Röhre liegt, während die Röhre 901 ihr Optimum bei 3.7 bis 4.0 GHz hatte, d. h. etwa in der Mitte des Bereichs 3.4 bis 4.2 GHz. Die Röhre 903 ist gegenüber 901 zu höheren Frequenzen hin verschoben. Sie liegt damit am Rand des 4 GHz Bandes und ist daher nicht so flexibel einsetzbar wie die Röhre 901.

Der Frequenzgang der Kompression verbesserte sich kaum. Der bisherige Wert von 1.2 dB Änderung über 300 MHz sank nur auf 1,0 dB ab, nicht auf die angestrebten 0,8 dB.

Das Datenblatt in Abbildung 4-3 (Seite 30) zeigt Messergebnisse der Röhre TL4062E/903.

4.2.1.4 TL4062E,904 (modifizierter Wendeltaper, kt)

Das Röhrenkonzept dieser Röhre ist in Kapitel 3 unter 3.1.4.4, S.9 beschrieben.

Die Messwerte der Röhre zeigen, dass das Ziel eines niedrigeren kt erreicht wurde, während sich jedoch der Wirkungsgrad verschlechterte.

Der Wirkungsgrad lag mit knapp 65 bis 67 % etwa 2% unter dem Zielwert. Der AM-PM Transfer Koeffizient kt verbesserte sich von bisher 11 bis 12 °/dB auf 8.8 °/dB. Der angestrebte Wert von maximal 8 °/dB wurde nicht ganz erreicht. Der Verlauf der kt Kurve ist nahe der Sättigung nicht mehr so steil und auch die Änderung über der Frequenz verbesserte sich.

Allerdings ist die kt Kurve im Verlauf über der Ansteuerung wellig. Die Phasenkurve ist nicht glatt und auch die Kurve der Verstärkung über der Frequenz ist stark wellig. Diese Auffälligkeiten deuten auf eine Störung des Wechselwirkung zwischen Strahl und Welle durch rücklaufende Elektronen hin. Es gelang nicht, diese Effekte durch Fokussieren zu beseitigen.

Das Datenblatt in Abbildung 4-4 (Seite 31) zeigt Messergebnisse der Röhre TL4062E/904.

4.2.1.5 TL4098, 902 (neuer Wendeltaper für 80 W), 903 (m. Kanone), 904 (m. Wendeltaper)

Das Röhrenkonzept dieser Röhren ist in Kapitel 3 unter 3.1.4.1, S.8, , 3.5, S. 17 und 3.1.4.2, S.8 beschrieben.

Die Bearbeitung (Fokussierung) der Röhren 902 und 904 verlief ohne Besonderheiten.

Die Ergebnisse der Röhre 904 sind beim Wirkungsgrad und bei den Nichtlinearitäten besser als bei der Röhre 902. Eine Erklärung dafür ist, dass die Wendelberechnung der Röhre 904 auf den genaueren Berechnungsparametern aus der Nachsimulation von der Röhre 902 basiert.

Die Röhre 903 war sehr schwierig zu fokussieren. Es wurde mit hohem Aufwand und mit mehreren Magnetsystemvarianten versucht, trotz der geänderten Kanone die Werte der Röhre 902 (gleiche Wendel) wieder zu erreichen, was leider nicht gelang. Neben einem schlechteren Wirkungsgrad lag der Unterschied vor allem bei einer wesentlich höheren Kompression.

Die erreichten Messergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Parameter	SN 902	SN 903	SN 904
Band	Oberband	Oberband	Unterbund
Frequenz	3.9 – 4.2 GHz	3.9 – 4.2 GHz	3.4 – 3.8 GHz
Strahlwirkungsgrad	35 %	36 %	35 %
Gesamtwirkungsgrad	62 %	60 %	63 %
Phase	51 °	52 °	48 °
Kompression	8.1	10.4	7.9

Mit den Röhren 902 und 904 konnte die vorhandene Programmlücke bei 80 W geschlossen werden. Es wurden zwar noch nicht die in diesem Projekt letztendlich angestrebten Wirkungsgrade erreicht, trotzdem sind die entwickelten Röhren für diese Frequenz und Leistungsklasse zur Zeit konkurrenzfähig.

Es ist vorgesehen, eine weitere Wirkungsgradverbesserung innerhalb des nachfolgenden Entwicklungsvorhabens zu erreichen.

Die Datenblätter in Abbildungen Abbildung 4-5, Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 (Seiten 32, 33 und 34) zeigen Messergebnisse der Röhren TL4098,902, 903 und 904.

4.2.1.6 TL4099E,913 (neues Wendelsystem, Variante 1 und neue Kanone)

Das Röhrenkonzept dieser Röhre ist in Kapitel 3 unter 3.1.2, S.6 u. 3.5, S.17 beschrieben.

Die Röhre TL4099/913 war zunächst schwierig zu fokussieren. Durch verschiedene Versuche am Magnetsystem und bei den Kollektormagneten konnte dieses Verhalten verbessert werden. Die erreichten Wirkungsgrade bei einer Bandbreite von 400 MHz liegen bei 63,7 bis 65,5 %.

Die Phasendrehung beträgt je nach Frequenz 33,1 bis 47,2 ° (Ziel: < 48 °), die Kompression 5,9 bis 6,5 dB (Ziel:< 7.5 dB).

Das Datenblatt in Abbildung 4-8 (Seite 35) zeigt Messergebnisse der Röhre TL4099E/913.

4.2.1.7 TL4099E,914 (neues Wendelsystem, Variante 2 und modifizierte Kanone)

Das Röhrenkonzept dieser Röhre ist in Kapitel 3 unter 3.1.2, S.6 u. 3.5, S.17 beschrieben.

Mit diese Röhre konnten nun auch bei 125 W sehr gute Wirkungsgrade von bis zu 69 % bei einzelnen Frequenzen erreicht werden. Wie bereits bei der 65 W Röhre war damit eine Phasendrehung von deutlich über 50° verbunden. Der höchste Wert lag bei 54 °. Das Ziel war eine Phasendrehung von maximal 48°.

Auch bei der Kompression zeigt sich, dass der gleiche Ansatz bei der Wendeldimensionierung wie bei der 65 W Röhre (TL4062E,901) auch zu ähnlichen Ergebnissen führt. Die Kompressionswerte liegen bei 5.3 bis 7.4 dB und damit innerhalb der angestrebten Grenzwerte von < 7,5 dB. Der gemessene Frequenzbereich reicht von 3,7 bis 4,2 GHz und weist damit eine Bandbreite von 500 MHz auf, die den Zielwert von 400 MHz sogar noch überschreitet.

Innerhalb eines Frequenzbereiches von 300 bis 400 MHz kann die Röhre mit geeignet gewählter Wendelspannung auf eine maximale Phasendrehung von 48 ° eingestellt werden.

Das Datenblatt in Abbildung 4-9 (Seite 36) zeigt Messergebnisse der Röhre TL4099E,914.

4.2.1.8 TL4099E,915 (modifizierte Kanone)

Das Röhrenkonzept dieser Röhre ist in Kapitel 3 unter 3.5, S.17 beschrieben.

Diese Röhre hatte massive Probleme mit der Fokussierung. Es wurden große Anstrengungen unternommen um mit Versuchen mit verschiedenen Magnetsystemen eine Verbesserung zu erreichen, was schließlich auch gelang.

Es gelang, sehr hohe Wirkungsgrade zu erzielen. Bei einzelnen Frequenzen wurde die 71 % Marke überschritten. Die Werte für Phasendrehung liegt etwa im Bereich der Röhre 914, die Werte der Kompression sind geringfügig niedriger.

Das Datenblatt in Abbildung 4-10 (Seite 37) zeigt Messergebnisse der Röhre TL4099E,915.

4.2.1.9 TL4099E,916 (verkürzte Eingangswendel)

Das Röhrenkonzept dieser Röhre ist in Kapitel 3 unter 3.1.5.1, S.10 beschrieben.

Aufgrund von Schwierigkeiten beim Aufbau der Röhre TL4099E,916 verzögerte sich das Pumpen dieser Röhre. Wegen der guten Ergebnisse, die in der Zwischenzeit mit Röhre 917 erzielt wurden, hatte die weitere Bearbeitung der Röhre 916 nur noch eine geringe Priorität und ist deswegen zurückgestellt.

4.2.1.10 TL4099E,917 (verlängerte Mittendämpfschicht)

Das Röhrenkonzept dieser Röhre ist in Kapitel 3 unter 3.1.5.2, S.10 beschrieben.

Für die Bearbeitung der Röhre TL4099E,917 waren von Anfang an verschiedene Magnetsysteme geplant, um das Verhalten bezüglich BWOs zu optimieren.

Nachdem die Leistungseinstellung von 115 W im Frequenzbereich von 3,655 bis 3,695 GHz zu diesem Zeitpunkt sehr gefragt war, wurde die Röhre 917 zunächst nur für diese Leistung und diesen Frequenzbereich eingestellt und optimiert.

Die Ergebnisse sind im Folgenden entsprechend der Reihenfolge der Magnetsysteme, wie sie im AP 2-01-03: Röhrenkonzept | Magnetsystem beschrieben sind, zusammengefasst.

1. Mit dem gleichen Magnetsystem wie bei der Röhre TL4099E,915 verhielt sich die Röhre 917 (leider) auch etwa gleich wie die Röhre 915. Die erhoffte Verbesserung bei BWOs trat nicht ein. Erfreulicherweise verbesserte sich aber der Frequenzgang der Ausgangsleistung über der Frequenz.
2. Mit dem höheren Magnetfeld verbessert sich nun auch das BWO Verhalten deutlich. Der BWO Abstand, d. h. die mögliche Erhöhung des Kathodenstroms I_k über den Arbeitspunkt hinaus, ohne das BWO auftritt, beträgt nun 40 % gegenüber vorher nur wenigen Prozenten. Die Fokussierung wurde etwas schwieriger, besonders im Overdrive. Was schwerer wiegt, ist dass sich der Wirkungsgrad um etwa 3 % verringerte.
3. Das Magnetsystem ist nun im Kanonenbereich modifiziert. Mit diesem Magnetsystem wird ein BWO Abstand von 28 % erreicht. Das Fokussierverhalten ist gut, ebenso der Wirkungsgrad mit Werten von über 70 %. Die Phasendrehung liegt unterhalb der gesetzten Grenze von maximal 48 °, ebenso die Kompression mit maximal 6,1 dB (< 7,5 dB).

Das Datenblatt in Abbildung 4-11 (Seite 38) zeigt die Messergebnisse der Röhre TL4099E,917.

4.2.1.11 TL4099E,918 (Verkopplungsbedingungen)

Das Röhrenkonzept dieser Röhre ist in Kapitel 3 unter 3.1.5.3, S.11 beschrieben.

Die Röhre TL4099E,918 erreichte das Ziel, die BWO Gefahr für eine Leistungseinstellung von 125 W zu bannen. Selbst bei einer Erhöhung des Kathodenstroms um über 40 % sind keine BWO mehr feststellbar.

Die Röhre erreicht auch einen Wirkungsgrad von 71 %, jedoch nur an der Frequenzecke 3,9 GHz des eingestellten Frequenzbereiches von 3,4 bis 3,9 GHz. Bereits bei 3,8 GHz fällt der Wirkungsgradwert auf 68 % ab und beträgt dann bei 3,4 GHz nur noch 65,6 %. Dies geht einher mit einer Änderung der Ausgangsleistung von 10 W im gemessenen Band.

Die Phasendrehung liegt mit 48,7 ° knapp außerhalb des Zielwertes von <48 °, die Kompression ist mit 5,9 dB sehr niedrig (Ziel < 7,5 dB).

4.2.2 Datenblätter

Im Folgenden sind die Datenblätter aufgeführt, auf die in den Kurzbeschreibungen im obigen Abschnitt 4.2.1 verwiesen wird.

page:

THALES ELECTRON DEVICES GmbH

Test Record No. 2
Output power, gain, dc power
voltage/current measurements

TL 4062E

Band:

(Pfnom= 2.5W)

drive	sat	sat	sat	sat	sat	zero		
temp /°C	amb	amb	amb	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.800	3.900	4.000	4.100	4.200	--	spec	spec
Pf /W	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	--	--
Uf /V	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	--	--
If /mA	568	568	568	568	568	568	--	--
Ug2 /V	2310	2310	2310	2310	2310	2310	--	Uh-300
Uh /V	3360	3360	3360	3360	3360	3360	--	7000
Uc1 /V	2500	2500	2500	2500	2500	2500	a	a
Uc2 /V	2250	2250	2250	2250	2250	2250	a	a
Uc3 /V	1400	1400	1400	1400	1400	1400	a	a
Uc4 /V	700	700	700	700	700	700	0a	750a
Ik /mA	50.03	50.03	50.03	50.03	50.03	50.03	--	--
P2* /dBm	6.14	6.37	6.62	6.75	6.79		--	--
P2 /dBm	48.22	48.31	48.38	48.32	48.20		--	--
P2 /W	66.37	67.76	68.87	67.92	66.07		b	--
P1* /dBm	-4.97	-5.09	-4.83	-5.20	-4.82		--	--
P1 /dBm	-8.55	-8.64	-8.36	-8.72	-8.34		-10	4
vp /dB	56.77	56.95	56.74	57.04	56.54		--	--
Ih /mA	.38	.28	.27	.32	.35	.04	--	--
Ic1 /mA	16.83	14.29	13.60	13.71	13.19	.04	--	--
Ic2 /mA	16.99	22.40	23.33	22.33	22.45	.03	--	--
Ic3 /mA	8.36	6.60	6.23	6.39	6.55	.48	--	--
Ic4 /mA	7.45	6.44	6.59	7.24	7.48	49.44	--	--
Ig2 /µA	2	2	2	2	2	0	--	--
Qdc /W	101.00	103.32	103.24	102.11	101.57	38.08	--	b
Qdis /W	34.6	35.6	34.4	34.2	35.5	38.1	--	--
ETA /%	65.7	65.6	66.7	66.5	65.0		--	--
ETA0 /%	39.5	40.3	41.0	40.4	39.3		--	--
P2ss*/dBm	-4.41	-3.80	-2.87	-2.47	-2.07		--	--
P2ss /dBm	37.67	38.14	38.89	39.10	39.34		--	--
P1ss*/dBm	-19.95	-20.08	-19.82	-20.18	-19.80		--	--
P1ss /dBm	-23.53	-23.63	-23.35	-23.70	-23.32		--	--
vpss /dB	61.20	61.77	62.24	62.80	62.66		--	--
comp /dB	4.4	4.8	5.5	5.8	6.1		--	10c
Uhsyn/V	3155	3149	3157	3135	3060		--	--
Vpsyn/dB	62.84	64.05	64.81	65.82	66.96		--	--

* = power meter reading (c.f.=100%)

(0/10/10)

µ_perv= .4506 ; Eta_c= 65.9 %

TWT No : 901 Test step : FET {DA1} Date : 26 Apr 2001
 Tester : A.Ott Evaluator : Q.A. :
 Test bench: C003K_KS_4DT EPC No. : 0024 BOX No. : 0012
 ISSUES: | Messprogramm: D6 010320 | Projekt: A5 001214 | Messmodul: A4 010125 |

Abbildung 4-1: Datenblatt TL4062E,901

THALES ELECTRON DEVICES GmbH

page:

Test Record No. 2
Output power, gain, dc power
voltage/current measurements

TL 4062E

Band:

(Pfnom= 2.51W)

drive	sat	sat	sat	sat	sat	zero	--	--
temp /°C	amb	amb	amb	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.400	3.500	3.600	3.700	3.800	--	spec	spec
Pf /W	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	--	--
Uf /V	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.2	5.0
If /mA	563	563	562	562	562	563	500	650
Ug2 /V	2437	2437	2437	2437	2438	2437	--	--
Uh /V	3300	3300	3300	3301	3301	3301	--	--
Uc1 /V	2600	2600	2600	2600	2600	2600	--	--
Uc2 /V	2300	2300	2300	2300	2300	2300	--	--
Uc3 /V	1650	1650	1650	1651	1650	1650	--	--
Uc4 /V	900	900	900	900	900	900	--	--
Ik /mA	55.05	55.06	55.06	55.06	55.06	55.06	--	--
P2* /dBm	7.12	7.35	7.51	7.54	7.50		--	--
P2 /dBm	48.43	48.55	48.59	48.55	48.42		--	--
P2 /W	69.71	71.58	72.24	71.60	69.50		--	--
P1* /dBm	7.36	7.79	8.09	8.50	9.25		--	--
P1 /dBm	2.98	3.50	3.88	4.35	5.14		--	--
vp /dB	45.45	45.05	44.70	44.20	43.28		--	--
Ih /mA	.49	.40	.35	.37	.42	.02	--	--
Ic1 /mA	12.09	9.64	8.57	8.28	8.19	.06	--	--
Ic2 /mA	21.64	24.45	25.72	25.36	24.16	.06	--	--
Ic3 /mA	9.49	10.39	10.68	10.97	11.95	.48	--	--
Ic4 /mA	11.32	10.14	9.71	10.05	10.30	54.45	--	--
Ig2 /µA	3	4	3	3	4	0	--	--
Qdc /W	111.17	111.41	111.47	110.75	109.75	52.65	--	--
Qdis /W	41.5	39.8	39.2	39.2	40.2	52.6	--	--
ETA /%	62.7	64.3	64.8	64.6	63.3		--	--
ETA0 /%	38.4	39.4	39.8	39.4	38.2		--	--
P2ss*/dBm	-2.58	-1.88	-1.44	-1.17	-0.87		--	--
P2ss /dBm	38.73	39.32	39.64	39.84	40.05		--	--
P1ss*/dBm	-7.67	-7.21	-6.96	-6.50	-5.76		--	--
P1ss /dBm	-12.06	-11.50	-11.17	-10.66	-9.86		--	--
vpss /dB	50.79	50.82	50.80	50.50	49.91		--	--
comp /dB	5.3	5.8	6.1	6.3	6.6		--	--

* = power meter reading (c.f.=100%)

(0/10/10)

µ_perv= .4576 ; Eta_c= 62.9 %

TWT No. : 902 Test step : FOC {CC1} Date : 4 Jul 2001 - 13:36
 Tester : Sch Evaluator : Q.A. :
 Test bench: C091v_2KS_4DT EPC No. : 220486 BOX No. : 221439
 ISSUES: | Messprogramm: D6 010320 | Projekt: E 990420 | Messmodul: A4 010125 |

Abbildung 4-2: Datenblatt TL4062E,902

page:

THALES ELECTRON DEVICES GmbH

Test Record No. 2
Output power, gain, dc power
voltage/current measurements

TL 4062 E

Type: 1

(Pfnom= 2.52W)

drive	sat	sat	sat	sat	zero	--	--
temp /°C	amb	amb	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.900	4.000	4.100	4.200	--	spec	spec
Pf /W	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	--	--
Uf /V	4.44	4.44	4.44	4.44	4.44	--	--
If /mA	568	567	567	568	568	--	--
Ug2 /V	2190	2190	2190	2190	2190	--	--
Uh /V	3440	3440	3440	3440	3440	--	--
Uc1 /V	2550	2550	2550	2550	2550	--	--
Uc2 /V	2200	2200	2200	2200	2200	--	--
Uc3 /V	1500	1500	1500	1500	1500	--	--
Uc4 /V	750	750	750	750	750	--	--
Ik /mA	47.24	47.24	47.24	47.24	47.24	--	--
P2* /dBm	6.28	6.52	6.74	6.84		--	--
P2 /dBm	48.22	48.28	48.31	48.25		43.71	--
P2 /W	66.37	67.30	67.76	66.83		65 23.5	--
P1* /dBm	-3.66	-4.05	-3.86	-3.60		--	--
P1 /dBm	-7.21	-7.58	-7.38	-7.12		-10a	1.5a
vp /dB	55.43	55.86	55.69	55.37		--	--
Ih /mA	.21	.21	.24	.40	.01	--	--
Ic1 /mA	16.31	15.78	15.20	15.60	.06	--	--
Ic2 /mA	15.98	17.73	19.27	18.32	.05	--	--
Ic3 /mA	8.27	6.95	5.92	5.91	.25	--	--
Ic4 /mA	6.41	6.53	6.58	6.96	46.84	--	--
Ig2 /µA	4	4	4	4	0	--	--
Qdc /W	<u>97.21</u>	<u>97.82</u>	<u>98.32</u>	<u>98.08</u>	38.32	--	43b
Qdis /W	30.8	30.5	30.6	31.2	38.3	c	c
ETA /%	68.3	68.8	68.9	68.1		--	--
ETA0 /%	40.8	41.4	41.7	41.1		--	--
P2ss*/dBm	-4.51	-3.90	-3.10	-2.70		--	--
P2ss /dBm	37.43	37.86	38.47	38.71		--	--
P1ss*/dBm	-18.73	-19.07	-18.85	-18.64		--	--
P1ss /dBm	-22.28	-22.60	-22.37	-22.16		--	--
vpss /dB	59.71	60.46	60.84	60.87		--	--
comp /dB	4.3	4.6	5.2	5.5		--	8.5

* = power meter reading (c.f.=100%)

(0/10/10)

Remarks:

- a = P1 ref spec. is 1.5 dBm + 0.5 dB over life
- . for type 2, 3, 4 P1 ref over 300 MHz max. 1.5 dB and for type 1 max. 2 dB pp
- b = avg. of all types per flight set
- c = Thermal Dissipation at

	zero	back off	sat.	overdr.
/ W	12/22	< 23	< 19.5	< 26

TWT No. : 903 Test step : CHECK1 {LA1} Date : 26 Nov 2001
 Tester : A.Ott Evaluator : Q.A. :
 Test bench: C003K_2KS_4DT EPC No. : 0024 BOX No. : 0012
 ISSUES: | Messprogramm: D8 011011 | Projekt: A4 010706 | Messmodul: A5 010125 |

Abbildung 4-3: Datenblatt TL4062E,903

page:

THALES ELECTRON DEVICES GmbH

Test Record No. 2
Output power, gain, dc power
voltage/current measurements

TL 4062E
Band:

(Pfnom= 2.48W)

drive	sat	sat	sat	sat	sat	zero	--	--
temp /°C	amb	amb	amb	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.400	3.500	3.600	3.700	3.800	--	spec	spec
Pf /W	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	--	--
Uf /V	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43	4.2	5.0
If /mA	560	560	560	561	561	561	500	650
Ug2 /V	2252	2252	2252	2252	2252	2252	--	--
Uh /V	3500	3501	3501	3500	3500	3501	--	--
Uc1 /V	2601	2600	2600	2600	2601	2601	--	--
Uc2 /V	2199	2198	2198	2198	2199	2198	--	--
Uc3 /V	1501	1500	1500	1500	1500	1500	--	--
Uc4 /V	801	800	801	800	801	800	--	--
Ik /mA	50.05	50.05	50.05	50.05	50.05	50.05	--	--
P2* /dBm	6.94	7.19	7.35	7.41	7.40		--	--
P2 /dBm	48.28	48.41	48.46	48.44	48.38		--	--
P2 /W	67.30	69.34	70.15	69.82	68.87		--	--
P1* /dBm	3.27	3.18	3.42	3.56	3.78		--	--
P1 /dBm	-1.10	-1.09	-.78	-.57	-.30		--	--
vp /dB	49.38	49.50	49.24	49.01	48.68		--	--
Th /mA	.73	.67	.58	.54	.59	.01	--	--
Ic1 /mA	15.08	14.38	14.25	14.25	14.34	.03	--	--
Ic2 /mA	18.64	20.39	20.78	20.13	18.71	.02	--	--
Ic3 /mA	8.30	8.04	7.91	8.12	8.72	.17	--	--
Ic4 /mA	7.27	6.53	6.50	6.96	7.66	49.83	--	--
Ig2 /µA	7	9	10	10	9	0	--	--
Qdc /W	103.55	104.33	104.33	103.44	102.21	42.76	--	--
Qdis /W	36.2	35.0	34.2	33.6	33.3	42.8	--	--
ETA /%	65.0	66.5	67.2	67.5	67.4		--	--
ETA0 /%	38.4	39.6	40.0	39.9	39.3		--	--
P2ss*/dBm	-2.29	-1.37	-.95	-.60	-.14		--	--
P2ss /dBm	39.05	39.85	40.16	40.43	40.84		--	--
P1ss*/dBm	-11.75	-11.82	-11.56	-11.41	-11.20		--	--
P1ss /dBm	-16.12	-16.09	-15.76	-15.54	-15.28		--	--
vpss /dB	55.17	55.94	55.92	55.97	56.12		--	--
comp /dB	5.8	6.4	6.7	7.0	7.4		--	--

* = power meter reading (c.f.=100%)

(0/10/10)

µ_perv= .4683 ; Eta_c= 66.4 %

TWT No. : 904 Test step : FOC {CA1} Date : 13 May 2002 - 14:46
 Tester : Sch Evaluator : Q.A. :
 Test bench: C091V_2KS_4DT EPC No. : 221176 BOX No. : 221439
 ISSUES: | Messprogramm: D9 020322 | Projekt: E 990420 | Messmodul: A5.2 010125 |

Abbildung 4-4: Datenblatt TL4062E,904

THOMSON TUBES ELECTRONIQUES GmbH

page:

Test Record No. 2
Output power, gain, dc power
voltage/current measurements

TL 4098

(Pfnom= 2.5W)

drive	sat	sat	sat	sat	zero		
temp /°C	amb	amb	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.900	4.000	4.100	4.200	--	spec	spec
Pf /W	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	--	--
Uf /V	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	--	--
If /mA	570	571	571	570	571	--	--
Ug2 /V	2540	2540	2541	2540	2540	2300	2800
Uh /V	3600	3600	3600	3600	3600	3100	3400
Uc1 /V	2650	2650	2650	2650	2650	1950	2200
Uc2 /V	2400	2400	2400	2400	2400	1700	1900
Uc3 /V	1500	1500	1501	1500	1500	1100	1300
Uc4 /V	750	750	750	750	750	500	650
Ik /mA	66.25	66.26	66.26	66.26	66.27	53.5	63.5
P2* /dBm	7.35	7.50	7.55	7.55		--	--
P2 /dBm	49.42	49.37	49.29	49.16		47.60	--
P2 /W	87.46	86.40	84.92	82.49		57.5	--
P1* /dBm	1.85	1.46	.88	.52		--	--
P1 /dBm	-1.91	-2.27	-2.84	-3.22		-10	0
vp /dB	51.33	51.63	52.13	52.38		--	--
Ih /mA	.60	.56	.56	.50	.03	--	--
Ic1 /mA	22.25	21.04	19.90	18.79	.15	--	--
Ic2 /mA	21.11	21.43	21.72	22.75	.08	--	--
Ic3 /mA	11.40	11.73	11.96	11.60	.54	--	--
Ic4 /mA	10.86	11.46	12.07	12.59	65.44	--	--
Ig2 /µA	-2	-2	-2	-2	0	-50	+300
Qdc /W	139.53	137.90	136.39	135.54	53.10	--	95.5a
Qdis /W	52.1	51.5	51.5	53.0	53.1	30	b
ETA /%	62.7	62.7	62.3	60.9		--	--
ETA0 /%	36.7	36.2	35.6	34.6		--	--
P2ss* /dBm	-.55	-.09	.35	.62		--	--
P2ss /dBm	41.52	41.78	42.09	42.23		--	--
P1ss* /dBm	-13.16	-13.54	-14.13	-14.49		--	--
P1ss /dBm	-16.92	-17.27	-17.85	-18.23		--	--
vpss /dB	58.44	59.04	59.94	60.46		--	--
comp /dB	7.1	7.4	7.8	8.1		--	10

* = power meter reading (c.f.=100%)

(0/10/10)

TWT No. : 902 Test step : CHECK {AF1} Date : 20 Sep 2000
 Tester : Herrmann Evaluator : Q.A. :
 Test bench: 1/C_068_V EPC No. : 660354 BOX No. : 220747
 ISSUES : | Messprogramm: D1 000615 | Projekt: A0 000831 | Messmodul: A1 000518 |

Abbildung 4-5: Datenblatt TL4098,902

THOMSON TUBES ELECTRONIQUES GmbH

page:

Test Record No. 2
Output power, gain, dc power
voltage/current measurements

TL 4098

(Pfnom= 2.45W)

drive	sat	sat	sat	zero		
temp /°C	amb	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.902	4.050	4.198	--	spec	spec
Pf /W	2.45	2.45	2.45	2.44	--	--
Uf /V	4.34	4.34	4.34	4.34	--	--
If /mA	564	564	564	563	--	--
Ug2 /V	2730	2730	2730	2730	--	Uh-300
Uh /V	3530	3530	3530	3530	--	7000
Uc1 /V	2700	2700	2700	2700	a	a
Uc2 /V	2450	2450	2450	2450	a	a
Uc3 /V	1500	1500	1500	1500	a	a
Uc4 /V	750	750	750	750	0a	750a
Ik /mA	64.68	64.68	64.68	64.68	--	--
P2* /dBm	7.42	7.65	7.80		--	--
P2 /dBm	49.37	49.31	49.20		--	--
P2 /W	86.56	85.31	83.10		b	--
P1* /dBm	1.67	1.11	.48		--	--
P1 /dBm	-2.14	-2.75	-3.47		-10	4
vp /dB	51.51	52.06	52.67		--	--
Ih /mA	.56	.56	.59	.05	--	--
Ic1 /mA	14.64	13.72	13.92	.24	--	--
Ic2 /mA	30.15	30.73	29.78	.18	--	--
Ic3 /mA	11.49	11.92	11.41	2.18	--	--
Ic4 /mA	7.81	7.73	8.95	62.03	--	--
Ig2 /µA	3	3	2	1	--	--
Qdc /W	140.92	140.44	138.91	53.50	--	b
Qdis /W	54.4	55.1	55.8	53.5	--	--
ETA /%	61.4	60.7	59.8		--	--
ETA0 /%	37.9	37.4	36.4		--	--
P2ss*/dBm	1.63	2.40	3.23		--	--
P2ss /dBm	43.58	44.06	44.63		--	--
P1ss*/dBm	-13.34	-13.89	-14.53		--	--
P1ss /dBm	-17.15	-17.75	-18.48		--	--
vpss /dB	60.73	61.81	63.11		--	--
comp /dB	9.2	9.8	10.4		--	10c

* = power meter reading (c.f.=100%)

(0/10/10)

TWT No. : 903 Test step : CHECK {AF1} Date : 17 Oct 2000
 Tester : Arslan. Evaluator : Q.A. :
 Test bench: 3/C_005_K EPC No. : 220427 BOX No. : 220610
 ISSUES : | Messprogramm: D2 000925 | Projekt: A3 000905 | Messmodul: A1 000518 |

Abbildung 4-6: Datenblatt TL4098,903

THOMSON TUBES ELECTRONIQUES GmbH

page:

Test Record No. 2
Output power, gain, dc power
voltage/current measurements

TL 4098

(Pfnom= 2.51W)

drive	sat	sat	sat	sat	sat	zero		
temp /°C	amb	amb	amb	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.442	3.500	3.600	3.700	3.838	--	spec	spec
Pf /W	2.52	2.52	2.52	2.51	2.51	2.52	--	--
UF /V	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	--	--
If /mA	571	571	571	570	570	571	--	--
Ug2 /V	2700	2700	2699	2700	2700	2700	--	Uh-300
Uh /V	3760	3760	3760	3760	3759	3760	--	7000
Uc1 /V	2700	2700	2700	2700	2700	2700	a	a
Uc2 /V	2400	2400	2400	2400	2400	2400	a	a
Uc3 /V	1500	1500	1500	1500	1500	1500	a	a
Uc4 /V	750	750	750	750	750	750	0a	750a
Ik /mA	65.32	65.32	65.32	65.32	65.33	65.32	--	--
P2* /dBm	8.31	8.49	8.74	8.77	8.72		--	--
P2 /dBm	49.22	49.36	49.51	49.49	49.39		--	--
P2 /W	83.50	86.26	89.29	88.90	86.98		b	--
P1* /dBm	5.67	5.66	5.72	5.44	5.87		--	--
P1 /dBm	.81	.82	.88	.62	1.09		-10	4
vp /dB	48.41	48.54	48.63	48.87	48.31		--	--
Ih /mA	.76	.71	.67	.66	.63	.03	--	--
Ic1 /mA	21.39	20.38	18.05	16.75	15.08	.11	--	--
Ic2 /mA	20.15	22.25	25.17	25.45	26.15	.04	--	--
Ic3 /mA	9.87	9.58	9.99	10.62	11.93	.56	--	--
Ic4 /mA	13.11	12.38	11.40	11.81	11.51	64.56	--	--
Ig2 /µA	-2	-2	-1	-1	-1	0	--	--
Qdc /W	136.14	137.25	137.70	136.09	134.88	52.30	--	b
Qdis /W	52.6	51.0	48.4	47.2	47.9	52.3	--	--
ETA /%	61.3	62.8	64.8	65.3	64.5		--	--
ETA0 /%	34.0	35.1	36.4	36.2	35.4		--	--
P2ss*/dBm	-.61	-.23	.52	.94	1.63		--	--
P2ss /dBm	40.30	40.64	41.29	41.66	42.30		--	--
P1ss*/dBm	-9.34	-9.35	-9.30	-9.58	-9.13		--	--
P1ss /dBm	-14.20	-14.20	-14.14	-14.40	-13.91		--	--
vpss /dB	54.50	54.83	55.43	56.06	56.22		--	--
comp /dB	6.1	6.3	6.8	7.2	7.9		--	10c

* = power meter reading (c.f.=100%)

(0/10/10)

TWT No. : 904 Test step : CHECK {AB1} Date : 24 Oct 2000
 Tester : P\$ Evaluator : Q.A. :
 Test bench: 1/C_004_V EPC No. : 220425 BOX No. : 660366
 ISSUES: | Messprogramm: D3 001020 | Projekt: A3 000905 | Messmodul: A2 001017 |

Abbildung 4-7: Datenblatt TL4098,904

page:

THOMSON TUBES ELECTRONIQUES GmbH

Test Record No. 2 TL 4099E
 Output power, gain, dc power
 voltage/current measurements

(Pfnom= 2.54W)

	sat	sat	sat	sat	sat	zero		MIN	MAX
drive	amb	amb	amb	amb	amb	amb	amb	spec	spec
temp /°C									
freq /GHz	3.400	3.500	3.600	3.700	3.800	--			
Pf /W	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54		--	--
Uf /V	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38		--	--
If /mA	580	581	580	581	581	580		--	--
Ug2 /V	2645	2646	2646	2646	2646	2646		--	--
Uh /V	3721	3721	3721	3721	3720	3720		--	--
Uc1 /V	2699	2700	2700	2700	2700	2699		--	--
Uc2 /V	2399	2399	2399	2399	2399	2399		--	--
Uc3 /V	1500	1500	1501	1500	1500	1500		--	--
Uc4 /V	499	499	499	499	499	499		--	--
Ik /mA	79.02	79.02	79.02	79.02	79.02	79.03		--	--
P2* /dBm	7.63	7.90	8.08	8.21	8.29			--	--
P2 /dBm	50.38	50.47	50.46	50.42	50.35			--	--
P2 /W	109.10	111.50	111.30	110.10	108.40			--	--
P1* /dBm	9.46	9.74	10.47	11.25	12.50			--	--
P1 /dBm	5.67	6.03	6.82	7.65	8.96			--	--
vp /dB	44.71	44.45	43.65	42.77	41.40			--	--
Ih /mA	.89	.97	1.02	1.05	1.10	.05		--	--
Ic1 /mA	21.04	23.86	24.20	24.01	23.49	.04		--	--
Ic2 /mA	35.66	32.59	31.24	29.91	28.92	.07		--	--
Ic3 /mA	12.14	11.72	12.11	12.94	13.89	.27		--	--
Ic4 /mA	9.23	9.85	10.42	11.09	11.60	78.62		--	--
Ig2 /µA	11	8	7	7	8	0		--	--
Qdc /W	171.04	171.28	170.00	168.01	166.08	42.62		--	--
Qdis /W	61.94	59.78	58.70	57.91	57.68	42.62		--	--
ETA /%	63.79	65.10	65.47	65.53	65.27			--	--
ETA0 /%	37.10	37.92	37.85	37.44	36.88			--	--
P2ss*/dBm	-1.42	-.89	-.49	-.25	-.40			--	--
P2ss /dBm	41.33	41.68	41.89	41.96	41.66			--	--
P1ss*/dBm	-5.53	-5.25	-4.54	-3.73	-2.52			--	--
P1ss /dBm	-9.32	-8.97	-8.19	-7.33	-6.07			--	--
vpss /dB	50.65	50.65	50.09	49.29	47.73			--	--

* = power meter reading (c.f.=100%) (0/10/10)

TWT No. : 913	Test step : CHECK	Date : 16 Jun 2000
Tester : Sch	Evaluator :	Q.A. :
Test bench: 3/C_003_K	EPC No. : 0024	BOX No. : 0012

ISSUES: | Messprogramm: D1 000207 | Projekt: Dummy | Messmodul: A1 990420 |

Abbildung 4-8: Datenblatt TL4099E,913

THALES ELECTRON DEVICES GmbH

page:

Test Record No. 2
Output power, gain, dc power
voltage/current measurements

TL 4099E

Band:

(Pfnom= 2.55W)

drive	sat	sat	sat	sat	sat	sat	zero	--	--
temp /°C	amb	amb	amb	amb	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.700	3.800	3.900	4.000	4.100	4.200	--	spec	spec
Pf /W	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	--	--
Uf /V	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.2	5.0
If /mA	582	582	582	582	582	582	582	500	650
Ug2 /V	2761	2762	2761	2762	2762	2762	2762	--	--
Uh /V	4001	4002	4001	4001	4001	4001	4001	--	--
Uc1 /V	3130	3129	3129	3130	3129	3129	3129	--	--
Uc2 /V	2649	2650	2650	2649	2650	2649	2649	--	--
Uc3 /V	1700	1700	1701	1701	1700	1701	1701	--	--
Uc4 /V	499	499	500	499	499	500	500	--	--
Ik /mA	73.60	73.60	73.60	73.60	73.60	73.60	73.60	--	--
P2* /dBm	9.87	10.01	10.02	10.18	10.19	10.15		--	--
P2 /dBm	50.90	50.99	50.93	51.00	50.97	50.93		--	--
P2 /W	123.00	125.60	123.90	125.90	125.00	123.90		--	--
P1* /dBm	-4.17	-4.70	-4.74	-4.22	-3.65	-2.87		--	--
P1 /dBm	-8.30	-8.78	-8.77	-8.23	-7.64	-6.85		--	--
vp /dB	59.20	59.77	59.70	59.23	58.61	57.78		--	--
Ih /mA	.55	.60	.64	.80	.91	1.08	.01	--	--
Ic1 /mA	16.76	19.42	19.84	22.90	24.26	25.24	.07	--	--
Ic2 /mA	38.39	35.70	35.00	31.10	29.14	27.88	.05	--	--
Ic3 /mA	11.12	10.47	9.98	10.22	10.22	10.13	.52	--	--
Ic4 /mA	6.76	7.38	8.09	8.56	9.04	9.24	72.97	--	--
Ig2 /µA	3	3	3	4	4	4	0	--	--
Qdc /W	181.17	181.82	180.97	181.47	181.21	181.55	40.31	--	--
Qdis /W	58.2	56.2	57.1	55.6	56.2	57.7	40.3	--	--
ETA /%	67.9	69.1	68.5	69.4	69.0	68.2		--	--
ETA0 /%	41.8	42.6	42.1	42.8	42.4	42.1		--	--
P2ss*/dBm	.21	.50	.92	1.61	1.95	2.52		--	--
P2ss /dBm	41.24	41.48	41.83	42.43	42.73	43.30		--	--
P1ss*/dBm	-19.18	-19.73	-19.71	-19.21	-18.67	-17.87		--	--
P1ss /dBm	-23.31	-23.81	-23.74	-23.22	-22.66	-21.85		--	--
vpss /dB	64.55	65.29	65.57	65.65	65.39	65.15		56	--
comp /dB	5.3	5.5	5.9	6.4	6.8	7.4		--	--

* = power meter reading (c.f.=100%)

(0/10/10)

µ_perv= .5073 ; Eta_c= 66 %

TWT No. : W914 Test step : FET {DA1} Date : 27 Jul 2001
 Tester : Sch Evaluator : Q.A. :
 Test bench: C091V_2KS_4DT EPC No. : 220486 BOX No. : 221439
 ISSUES: | Messprogramm: D7 010705 | Projekt: A1 960917 | Messmodul: A5 010125 |

Abbildung 4-9: Datenblatt TL4099E,914

THALES ELECTRON DEVICES GmbH

page:

Test Record No. 2					TL 4099E	
Output power, gain, dc power voltage/current measurements					Band:	
(Pfnom= 2.5W)						
drive	sat	sat	sat	zero	--	--
temp /°C	amb	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.750	3.900	4.100	--	spec	spec

Pf /W	2.50	2.50	2.50	2.50	--	--
Uf /V	4.40	4.40	4.40	4.40	4.2	5.0
If /mA	569	569	569	569	500	650

Ug2 /V	3020	3020	3020	3021	--	--
Uh /V	4100	4100	4100	4100	--	--
Uc1 /V	3150	3150	3150	3150	--	--
Uc2 /V	2850	2850	2850	2850	--	--
Uc3 /V	2250	2250	2250	2250	--	--
Uc4 /V	750	750	750	750	--	--
Ik /mA	74.04	74.03	74.03	74.04	--	--

P2* /dBm	10.26	10.36	10.29		--	--
P2 /dBm	51.28	51.27	51.07		--	--
P2 /W	134.30	134.00	127.90		--	--
P1* /dBm	-2.23	-1.84	- .56		--	--
P1 /dBm	-6.33	-5.87	-4.55		--	--
vp /dB	57.61	57.14	55.62		--	--

Ih /mA	.56	.63	.68	.02	--	--
Ic1 /mA	18.33	19.21	19.98	.02	--	--
Ic2 /mA	23.09	22.84	22.66	.02	--	--
Ic3 /mA	24.67	22.93	21.07	.31	--	--
Ic4 /mA	7.35	8.40	9.63	73.67	--	--
Ig2 /µA	2	1	2	0	--	--

Qdc /W	189.37	188.59	187.45	58.66	--	--
Qdis /W	55.1	54.6	59.5	58.7	--	--
ETA /%	70.9	71.1	68.2		--	--
ETA0 /%	44.2	44.1	42.1		--	--

P2ss* /dBm	1.20	2.07	2.46		--	--
P2ss /dBm	42.22	42.98	43.24		--	--
P1ss* /dBm	-17.27	-16.84	-15.54		--	--
P1ss /dBm	-21.37	-20.87	-19.53		--	--
vpss /dB	63.59	63.85	62.77		56	--

comp /dB	6.0	6.7	7.2		--	--

* = power meter reading (c.f.=100%)

(0/10/10)

TWT No. : 915 Test step : Ref v VT {LA1} Date : 5 Jun 2002
 Tester : Patan Evaluator : Q.A. :
 Test bench: C091V_2KS_4DT EPC No. : 221176 BOX No. : 221439
 ISSUES: | Messprogramm: D9 020322 | Projekt: E1 990428 | Messmodul: A5.2 010125 |

Abbildung 4-10: Datenblatt TL4099E,915

page:

THALES ELECTRON DEVICES GmbH

Test Record No. 2 TL 4099E
Output power, gain, dc power
voltage/current measurements Type:

(Pfnom= 2.53W)

drive	sat	sat	zero	--	--
temp /°C	amb	amb	amb	MIN	MAX
freq /GHz	3.655	3.695	--	spec	spec

Pf /W	2.53	2.53	2.53	--	--
Uf /V	4.52	4.52	4.52	--	--
If /mA	560	559	560	--	--
Ug2 /V	2620	2620	2619	--	--
Uh /V	4249	4249	4249	--	--
Uc1 /V	3100	3100	3100	--	--
Uc2 /V	2850	2850	2850	--	--
Uc3 /V	2251	2251	2252	--	--
Uc4 /V	751	750	751	--	--
Ik /mA	63.06	63.06	63.06	--	--

P2* /dBm	8.86	9.01		--	--
P2 /dBm	50.56	50.57		49.14	--
P2 /W	113.70	114.10		82	--
P1* /dBm	7.78	8.40		--	--
P1 /dBm	4.07	4.70		-10a	1.5a
vp /dB	46.49	45.88		--	--
Ih /mA	.66	.69	.04	--	--
Ic1 /mA	19.86	19.84	.06	--	--
Ic2 /mA	17.23	17.38	.09	--	--
Ic3 /mA	17.75	17.41	.76	--	--
Ic4 /mA	7.54	7.71	62.09	--	--
Ig2 /µA	2	2	2	--	--
Qdc /W	161.63	161.47	51.49	--	139b
Qdis /W	47.9	47.4	51.5	c	c
ETA /%	70.3	70.7		--	--
ETA0 /%	42.4	42.6		--	--

P2ss*/dBm	- .45	.07		--	--
P2ss /dBm	41.25	41.63		--	--
P1ss*/dBm	-7.23	-6.63		--	--
P1ss /dBm	-10.95	-10.33		--	--
vpss /dB	52.19	51.97		--	--

comp /dB	5.7	6.1		--	8.5

* = power meter reading (c.f.=100%) (0/10/10)
a = P1 ref spec. is 1.5 dBm + 0.5 dB over life µ_perv= .4702 ; Eta_c= 68.7 %
. P1 ref for type 5, 6 and 8 over 300 MHz max. 1.5 dB pp
. and for type 1 and 7 max. 2 dB pp
b = avg. of all types per flight set
c = Thermal Dissipation at | zero | back off | sat. | overdr. |
. / W | 40/58 | < 62 | < 57 | < 85 |

TWT No. : 917 Test step : PRE_FOC {BA1} Date : 16 May 2002 - 14:42
Tester : Neuh.Th. Evaluator : Q.A. :
Test bench: C086V_2KS_6DT EPC No. : 657213 BOX No. : 222172-0
ISSUES: | Messprogramm: D9 020322 | Projekt: A4 010706 | Messmodul: A5.2 010125 |

Abbildung 4-11: Datenblatt TL4099E,917

5 QUALIFIKATIONSMODELLE (EM/Q)

Für die 65 W und 125 W Leistungsklassen wurde je eine Röhre als EM/Q ausgewählt. Es sind dies die Röhren

- TL4062E,901 für 65 W und
- TL4099E,915 für 125 W.

Beide Röhren enthalten jeweils alle relevanten Neuerungen, die in der entsprechenden Leistungsklasse eingeführt werden.

Nachdem die EM/Q Röhren ins Gehäuse eingebaut waren, konnten die Umwelttests durchgeführt werden:

- Temperaturtests im Vakuum (sogenannter Thermovakuum Test, TV-Test).
- Schütteltestes (sogenannte Vibration Tests, VT), diese unterteilen sich in Sinus- und Random Schütteln.
- Schocktest.

5.1 Temperaturtests im Thermovakuum

Die Temperaturtests im Thermovakuum sind umfangreich und aufwendig. Die Röhre ist innerhalb einer Vakuumkammer auf einer Temperaturplatte aufgeschraubt. Durch die Wandung der Vakuumkammer müssen mit speziellen, vakuumdichten Durchführungen die folgende Leitungen geführt werden:

- 9 Zuleitungen für die Hochspannungsversorgung der Röhre
- 2 Hochfrequenzleitungen für den HF-Eingang und Ausgang der Röhre
- 50 Zuleitungen für 25 Thermoelemente (an der Röhre und der Temperaturplatte befestigt)
- 2 Zuleitungen für die Kühlflüssigkeit der Temperaturplatte

Zunächst wird an der eingebauten Röhre an Luft ein HF-Referenztest durchgeführt, mit dem der HF-Messplatz kalibriert wird. Alle nachfolgenden HF-Messungen sind dann nur noch Relativmessungen zu den Anfangsbedingungen. Die weiteren Schritte sind:

- Evakuieren der Vakuumkammer
- HF-Messungen der Röhre
- Temperaturzyklen zwischen der niedrigsten und höchsten zulässigen Temperatur zunächst bei ausgeschalteter Röhre (zwischen -35 und $+95$ °C), dann mit Röhrenbetrieb in Kleinsignal und anschließend mit Röhrenbetrieb in Sättigung (zwischen -20 und $+95$ °C).
- Einschalttest der Röhre bei der tiefsten und höchsten Temperatur (-35 und $+95$ °C)
- HF-Messungen der Röhre bei der tiefsten, mittleren und höchsten Temperatur (-20 , $+40$ und $+95$ °C)
- Temperaturmessungen der Röhre bei der höchsten Temperatur für verschiedene HF-Ansteuerpegel der Röhre: ohne Ansteuerung, Kleinsignal, Sättigung, Overdrive.
- Belüften der Vakuumkammer
- HF-Messungen der Röhre als Vergleichswerte zum anfänglichen Referenztest.

Ergebnisse des Thermovakuum Tests:

Die Schwankungen der HF-Werte der Röhren über der Temperatur waren innerhalb typischer Bandbreiten.

Bei der 65 W Röhre überschritten die gemessenen Temperaturwerte nur an einer Stelle der Röhre die zulässigen Werte der verwendeten Materialien. Es handelt sich hier, wie im Abschnitt 3.7.2 Thermische Belastungen (Seite 20) beschrieben, um das Vergussmaterial in der Röhrenmitte. Daraus wurde die Konsequenz gezogen, dass die Länge des Bereichs, in dem das Vergussmaterial mit der höheren Wärmeleitung (und höheren Masse) eingesetzt wird, vergrößert wurde. Kontrollmessungen an Röhren, die entsprechend ausgeführt waren, zeigten, dass diese Maßnahme ausreichend war.

Bei der 125 W Röhre überschritten die Temperaturwerte an keiner Stelle der Röhre die zulässigen Werte der verwendeten Materialien.

In einem Test im Anschluss an den Thermovakuum Test zeigten die Röhren keine Veränderung der HF-Eigenschaften gegenüber den Messungen vor dem Test.

5.2 Schüttel Tests

Für die Vibration Tests wurden die bisher bekannten maximalen Pegel verwendet: bei Random Vibration 23 grms, bei Sinus Vibration 22 g. Die Röhren wurde im Betrieb geschüttelt, ohne Ansteuerung.

Die Ergebnisse der Vibration Tests waren alle in Ordnung. Die Röhren zeigten bei den HF-Messungen nach dem Vibration Test keine Änderungen.

5.3 Schocktest

Auch für den Schocktest wurden die bisher bekannten maximalen Pegel verwendet. Dies ist für alle 3 Achsen der Pegel von 9520 g. Die Röhren wurden dem Schocktest 3 mal je Achse, im Betrieb mit Sättigungsansteuerung (65 W Röhre) und Kleinsignalansteuerung (125 W Röhre), unterzogen.

Die Ergebnisse des Schocktests waren alle in Ordnung. Die Röhre zeigte auch bei den HF-Messungen nach dem Schock Test keine Änderungen gegenüber den HF-Tests vor dem Schocktest. Bei einem Schocktest schaltete die Röhre aufgrund eines Anstiegs des Wendelstroms ab. Dies ist beim Schocktest zulässig und deutet auf eine Gasfreisetzung, aufgrund der mechanischen Belastung, innerhalb der Röhre hin.

6 AUSBLICK

Zunächst darf hier auf die bereits am Beginn des Berichtes gezeigte Zusammenfassung verwiesen werden.

Herauszuheben sind bei den in diesem Entwicklungsvorhaben neu entwickelten C-Band Wanderfeldröhren:

- die erreichten Wirkungsgrade von 68 bis 69 %, zum Teil über 70 %
- die niedrige Kompression von kleiner 7,5 dB
- die erhöhte Bandbreite der HF-Ankopplung von 300 auf 600 MHz
- die erfolgreiche Prüfung auf mechanische und thermische Umwelttauglichkeit
- der erfolgreiche Einsatz in bereits mehreren Fertigungsprojekten

Es ist vorgesehen, die nicht erreichten Ziele beziehungsweise noch nicht gelösten Probleme innerhalb des nachfolgenden Entwicklungsvorhabens zu bearbeiten. Es sind dies:

- die Verringerung der Röhrenmasse
- die Verringerung von k_t
- die Verbesserung des BWO Verhaltens
- weitere Wirkungsgradverbesserung der 80 W Röhre auf den Stand bei 65 W und 125 W.

Das folgende neue Ziele wird in das nachfolgende Entwicklungsvorhaben aufgenommen:

- weitere Wirkungsgradverbesserung bei den 65 W und 125 W Röhren.

7 VERZEICHNIS (TABELLEN, ABBILDUNGEN, FORMELN, LITERATUR)

7.1.1.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Entwicklungsziele	4
Tabelle 3-1: Wendelsimulation für kurze / lange Wendel	7
Tabelle 4-1: Übersicht zu hergestellten Röhren und deren Neuerungen	22

7.1.1.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Wendelsystem, Querschnitt (schematische Darstellung).....	5
Abbildung 3-2: Wendelsystem Variante 1 und 2 (schematische Darstellung).....	6
Abbildung 3-3: HF-Anpassung mit und ohne Anpassungsblende (Beispiel)	12
Abbildung 3-4: Prinzipskizze zur Anpassungsblende.....	13
Abbildung 3-5: Hülle mit Magnetsystem (3 verschiedene Magnetdurchmesser).....	14
Abbildung 3-6: Beispiel für Magnetsystemversuche	15
Abbildung 3-7: Beispiel für eine Kt Verbesserung mit Linearisierer (LTWT)	20
Abbildung 4-1: Datenblatt TL4062E,901.....	28
Abbildung 4-2: Datenblatt TL4062E,902.....	29
Abbildung 4-3: Datenblatt TL4062E,903.....	30
Abbildung 4-4: Datenblatt TL4062E,904.....	31
Abbildung 4-5: Datenblatt TL4098,902	32
Abbildung 4-6: Datenblatt TL4098,903	33
Abbildung 4-7: Datenblatt TL4098,904	34
Abbildung 4-8: Datenblatt TL4099E,913.....	35
Abbildung 4-9: Datenblatt TL4099E,914.....	36
Abbildung 4-10: Datenblatt TL4099E,915.....	37
Abbildung 4-11: Datenblatt TL4099E,917.....	38

7.1.1.3 Formelverzeichnis

Gleichung 3-1: Kanonenperveanz	18
Gleichung 3-2: Strahlwirkungsgrad	18

7.1.1.4 Literaturhinweis

- [1] Abschlußbericht „Wirkungsgradoptimierung auf 70% im Ku-Band und auf 65% im C-Band“ für DLR, April 1999