

Temperatur-Stresstest

Hohe Anforderungen an Wanderfeldröhren für die Datenkommunikation in Satelliten

Satellitentechnik im Alltag

Die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Satellitentechnologie ist beeindruckend. Ihre Spuren finden sich heute in weiten Bereichen unseres täglichen Lebens wieder. Beinahe schon selbstverständlich sind etwa die vielfältigen Multimedia-Angebote von satellitenbasierten TV-Programmen oder Nachrichtensendungen. Ähnliches gilt für die Navigation mit Hilfe moderner GPS-Leitsysteme. Diese sind für viele Menschen eine praktische und bereits unentbehrliche Hilfe zur schnelleren und ökonomischen Fortbewegung. Selbst bei der Planung von Freizeitaktivitäten verlassen wir uns auf die immer präziseren Vorhersagen anhand der umfangreichen Daten von Wettersatelliten. Auch der Umweltschutz profitiert durch die Beobachtungsmöglichkeit aus dem All – etwa beim Aufspüren von ungewöhnlichen Temperaturänderungen der Meeresoberfläche als Indikator für unerlaubte Verklappungen oder bei der Detektion von großflächigen Bränden. Im militärischen Bereich kommen Satelliten schon seit längerem zum Einsatz, überwiegend für Überwachungs- und Schutzaufgaben sowie bei der Koordination.

Die Umlaufbahn der Satelliten richtet sich nach ihren spezifischen Aufgaben. Fernseh- und Nachrichtensatelliten etwa befinden sich auf einem Orbit von ca. 36.000 km Höhe und sind damit geostationär. Dies ermöglicht den stabilen terrestrischen Empfang selbst komplex verschlüsselter Multimedia-Daten in Digital-Quali-

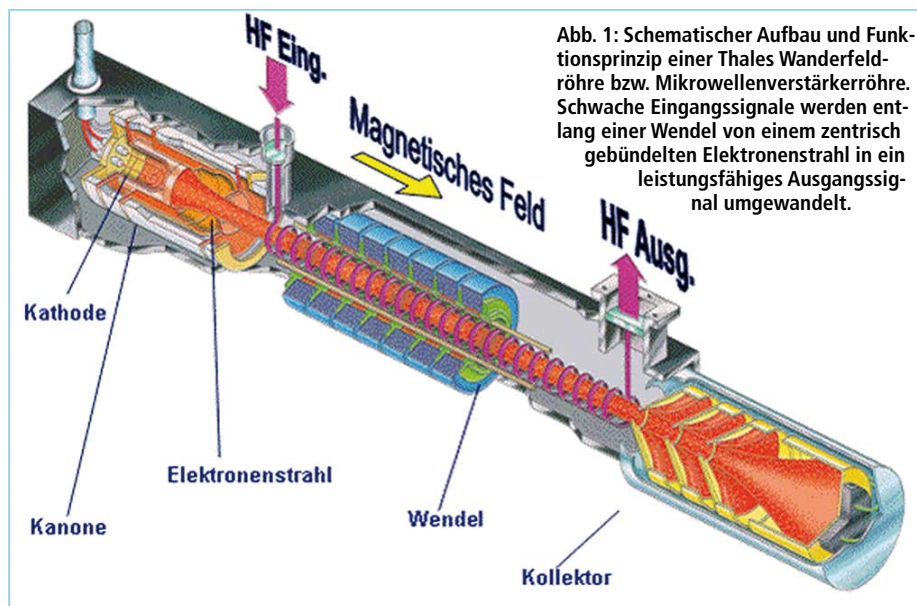
In der Satellitentechnik werden Wanderfeldröhren als leistungsfähige und robuste Verstärkersysteme für Mikrowellensignale eingesetzt. Die Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit der Röhrenverstärker sind sehr hoch. Im Orbit beträgt ihre durchschnittliche Einsatzdauer z.B. in geostationären Satelliten wie Astra etwa 15–18 Jahre. Bereits im Vorfeld finden intensive Funktions- und Belastungsprüfungen statt, um einen störungsfreien Einsatz zu gewähren. Zyklische Temperatur-Stresstests stellen sicher, dass die Signalverstärkung auch bei schwankenden Außenbedingungen zwischen -40°C und $+90^{\circ}\text{C}$ stets im Toleranzbereich liegt. Die Prozessthermostate der Serie LAUDA Integral XT 250 W eignen sich hervorragend für die Simulation dieser anspruchsvollen Prüfzyklen. Sie erweisen sich auch im Dauerbetrieb unter härtesten Einsatzbedingungen als besonders zuverlässig.

tät. Demgegenüber bewegen sich militärische Aufklärungs- oder Spionagesatelliten auf weit niedrigeren Umlaufbahnen, um eine möglichst detailscharfe Bildauflösung zu erhalten. Nahe der Erdatmosphäre nimmt jedoch auch die Reibungshitze massiv zu. Dies verkürzt die Lebensdauer eines Satelliten erheblich. Die technischen Systeme und insbesondere ihre Empfangs- und Sendeeinheiten für die Kommunikation müssen daher äußerst robust ausgelegt sein. Nur so können sie den rauen Bedingungen im All dauerhaft widerstehen. Zu den kritischen Faktoren gehören auch die wiederkehrenden Tag-Nacht Temperaturschwankungen zwischen -25°C und $+80^{\circ}\text{C}$ im Inneren des Satelliten, aber auch star-

ke, dauerhafte Hitzebelastungen aufgrund von atmosphärischen Reibungseffekten.

Herzstück der satellitengestützten Datenkommunikation – die Wanderfeldröhre

Die Datenkommunikation der Satelliten stellt höchste Anforderungen an die Nachrichtentechnik und Feinmechanik des Systems. Zum einen müssen die schwachen Signalstärken im Orbit präzise und mit möglichst hoher Linearität in einem definierten Frequenzband verstärkt werden. Zum anderen sind die empfindlichen Signalverstärker vor negativen Einflüssen, überwiegend bedingt durch Hitze oder Kälte, sicher abzuschirmen. Die gerade noch tolerierte Schwankung der Ausgangssignal-Qualität liegt bei nur $\pm 1\%$. Von dieser dauerhaft hohen Leistung – einer Grundvoraussetzung für die Transmission digital codierter TV- und Nachrichteninformation – wiederum profitieren die Nutzer bzw. terrestrischen Empfänger der Satellitensignale. Weltweit verfügen derzeit zwei Unternehmen über das fertigungstechnische Know-how zur Herstellung von Wanderfeldröhren bzw. Mikrowellenverstärkerröhren. Das Unternehmen Thales hat für Raumfahrt-Anwendungen inzwischen über 8.000 Wanderfeldröhren, engl. Traveling-Wave Tubes (TWTs), produziert – die Mehrzahl hiervon für den Radarbereich. Im Durchschnitt ist ein Satellit mit etwa 30–50 solcher Verstärkereinheiten ausgestattet. Alle TWTs, ob Neuentwicklung oder Serienmodell, werden bei Thales aufwändigen Testverfahren unterzogen. Diese garantieren



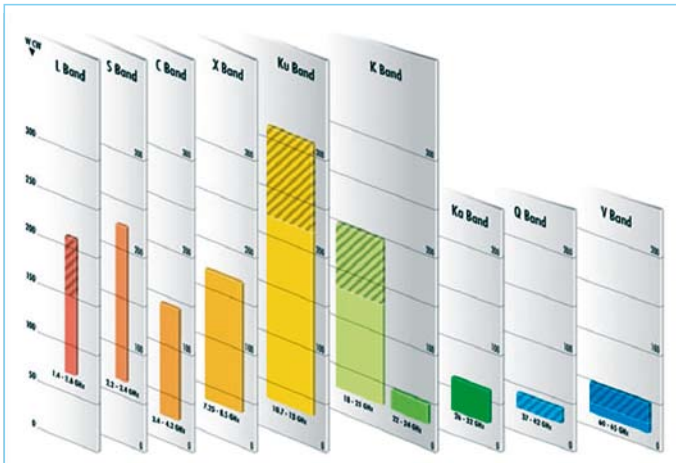


Abb. 2: Übersicht des Frequenzspektrums von Thales Wanderfeldröhren. Die Leistung beträgt im L, S, C, X, Ku, K, Ka, Q und V-Band bis zu 300 W.

gleich bleibend hohe Qualität und ein Maximum an Systemzuverlässigkeit.

Blick ins Innere der Röhre

Das Prinzip der TWT basiert auf einem besonderen physikalischen Effekt: Wandert eine elektromagnetische Welle (HF) entlang einer Drahtwendel (Helix), in dessen Inneren sich ein Elektronenstrahl befindet, so wird die HF-Welle in Interaktion mit dem Elektronenstrahl verstärkt (Abb. 1). Schwache Eingangssignale lassen sich so in ein leistungsfähiges Ausgangssignal umwandeln. Im Vakuum der Röhre werden hierzu von einer Kathode Elektronen erzeugt und zur Anode hin beschleunigt. Ein Magnetfeld kontrolliert und fokussiert die Elek-

tronen im Zentrum der Wendel, um einen maximalen Wirkungsgrad zu erzielen. Während sich die hochfrequente Welle (HF) auf der Wendel ausbreitet, wird ein Teil der kinetischen Energie des Elektronenstrahles an diese abgegeben. Hierdurch verstärkt sich die Welle in Ausbreitungsrichtung des Elektronenstrahles. Am Ende der Wendel werden überschüssige Elektronen im Kollektor durch Elektroden abgebremst. Die restliche kinetische Energie wird in Wärme umgewandelt. Der Wirkungsgrad moderner Thales Röhren liegt bei beachtlichen 70 %. Wanderfeldröhren unterschiedlicher Dimension und technischer Ausstattung decken inzwischen das gesamte Mikrowellenspektrum ab (Abb. 2). Der Leistungsbereich ist dabei den



Abb. 3: Parallel-Prüfstand zum Test der thermischen Stabilität von Wanderfeldröhren. Die extremen Prüfbedingungen zwischen -40°C und $+90^{\circ}\text{C}$ erzeugen Lauda Integral XT 250 W Prozessthermostate.

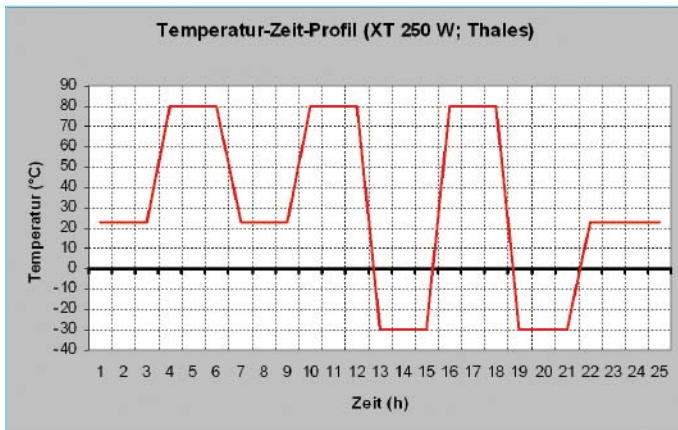


Abb. 4: Beispiel eines Temperatur-Stresstests von Thales Wanderfeldröhren – Schema aus einem zyklischen Langzeit-Prüfprogramm zwischen -30°C und $+80^{\circ}\text{C}$.

unterschiedlichen Erfordernissen und Einsatzgebieten selektiv angepasst. Er liegt abhängig vom Frequenzband zwischen 30 W und 5 kW Ausgangsleistung.

Temperaturschwankungen können die Stärke und Stabilität des äußeren Magnetfeldes beeinflussen – und wirken sich dadurch negativ auf den Helixstrom aus. Unter ungünstigen Bedingungen betragen dessen Schwankungen bis zu $\pm 10\%$. Um den Temperatureinfluss so gering wie möglich zu halten, sind entsprechende technische Modifikationen und Korrekturen erforderlich. Mit Hilfe aufwändiger thermischer Simulationsprüfungen lassen sich solche Effekte quantitativ im Labor erfassen. Thales führt die thermischen Stabilitätsprüfungen auf einem speziell entwickelten Temperatur-Prüfstand

durch (Abb. 3). Die zu testende Einheit wird hierfür mit einer Kühl-/Heizplatte wärmeleitend verbunden. Letztere wiederum wird von einem Hochleistungs-Prozessthermostaten mit dem entsprechend temperierten Medium versorgt. Die Kühl-/Heizplatte wird nach genau vorgegeben Profilen temperiert (Abb. 4). Eine Reihe von Sensoren zeichnet während des Versuchs die elektronischen Parameter und Änderungen des Helixstroms exakt auf. Anhand der Prüfprotokolle lassen sich exakte Rückschlüsse auf die thermische Gesamtstabilität des Systems ziehen. Die Prüfanordnung ist so dimensioniert, dass sich die wechselnden thermomechanischen Bedingungen im Orbit perfekt simulieren lassen. Im späteren, einsatzfertigen Komplettsystem erfolgt der Wärmeaustausch der

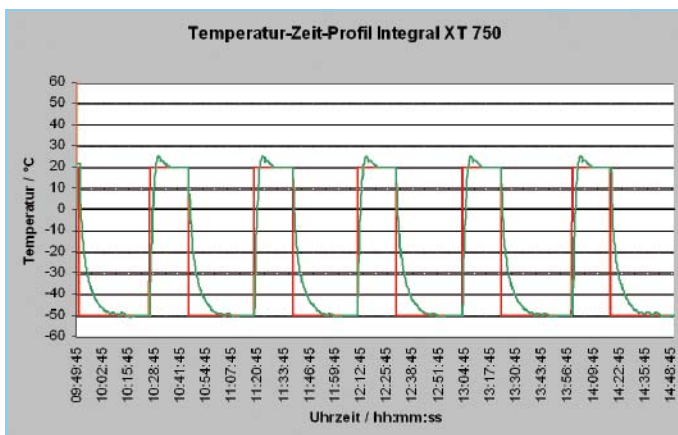


Abb. 6: Extrem schnelle und zuverlässige Temperatur-Wechsel zwischen -50°C und $+20^{\circ}\text{C}$. Leistungsdiagramm mit Soll- und Istwertkurve (rot bzw. grün) eines Lauda Integral XT 750 Thermostaten.

Abb. 5: Lauda Integral XT 250 W (links) und XT 950 W (rechts) Prozessthermostat – hervorragend geeignet für anspruchsvolle Temperaturstresstests.



Röhre durch den perfekten Kontakt mit dem Gehäuse.

Wechseltemperaturtest mit dem Lauda Thermostaten Integral XT

Extreme Prüfbedingungen stellen besondere Ansprüche an die technische Ausrüstung. Sehr schnelle Temperaturwechsel sowie lange Prüfzyklen verlangen von der Temperiervorrichtung maximale Leistung und technische Perfektion – und das im kontinuierlichen Dauerbetrieb. Die Lauda Prozessthermostate Integral XT 250 W und XT 950 W (Abb. 5) bringen diese Voraussetzungen uneingeschränkt mit. Mit einer Minimaltemperatur von -50°C und einem Spitzenwert von $+200^{\circ}\text{C}$ (bzw. $+300^{\circ}\text{C}$ in der Hochtemperaturversion) ist das Anforderungsprofil für den Standardtest der Wanderfeldröhren komplett abgedeckt. Als Leistung stehen beim XT 250 W 3,5 kW Heiz- und 2,1 kW Kälteleistung zur Verfügung. Beim XT 950 W beträgt die Heizleistung 5,2 kW und die Kälteleistung 9 kW. Die sehr schnellen Temperaturänderungen der XT Thermostaten beruhen auf dem geringen internen Wärmeträgervolumen. Bei dem neu entwickelten Prinzip zirkuliert die Temperierflüssigkeit im Gesamtsystem zudem ohne jeden Kontakt zur Umgebungsluft – von besonderem Vorteil für den reibungslosen Dauerbetrieb. Dieses verhindert das Einkondensieren von Luftfeuchtig-

keit bei tiefen Temperaturen oder eine Geruchsbelästigung bei hohen Werten. Über den gesamten Temperaturbereich von -50°C bis $+200^{\circ}\text{C}$ ist folglich kein Medienwechsel erforderlich. Für unterschiedlichste Prüfanforderungen oder parallele Prüfansätze bietet Lauda mehrere Leistungsklassen. Das stärkste Modell der Serie Integral XT verfügt über eine Kälteleistung von 18 kW bei 20°C und über beachtliche 2kW bei -40°C . Hiermit sind selbst noch bei eisiger Kälte hohe Wärmelasten zu entfernen. Da sich die Prüfstände bei Thales in klimatisierten Räumen befinden, ist der zusätzliche Wärmeintrag ins Labor möglichst niedrig zu halten. Die effiziente Wasserkühlung der Integral XT Thermostate trägt dem voll Rechnung.

Zu den härtesten thermomechanischen Material- und Funktionstests zählen die rasch aufeinander folgenden Wechsel zwischen extremen Temperaturen (Abb. 6). Sie beanspruchen sowohl den Prüfling aufs Äußerste und verlangen auch vom Thermostaten ein Maximum an Zuverlässigkeit. Testzyklen im Bereich von -40°C und $+90^{\circ}\text{C}$ und eine hohe Wiederholungsrate sind bei Thales Bestandteil des Standard-Prüfprogramms. Ähnlich harte Prüfanforderungen mit schnellen Wechseln zwischen eisiger Kälte und hoher Hitze gibt es auch in der Automobil- und Zulieferindustrie. Das Bestehen von entsprechend harten Normprüfungen ist dort Voraussetzung für



Abb. 7: Auf einen Blick alles sicher unter Kontrolle – mit der komfortablen Command Konsole.

eine Produktzulassung und wichtiger Bestandteil des Qualitätsmanagement Systems. Die Gesamtdauer solcher thermischer Funktionsprüfungen kann je nach Vorschrift mehrere Wochen betragen. Hierbei entstehen annähernd realistische thermische Belastungsmuster, analog zur Situation des späteren unwirtlichen Einsatzbereichs. Und all dies erfolgt zeitlich hoch komprimiert – sozusagen im Zeitraffertempo.

Neben zyklischen Belastungstests spielen auch Funktionsprüfungen mit absolut konstanten Temperaturbedingungen eine Rolle. Hierunter zählen Langzeitprüfungen bei sehr hohen sowie sehr niedrigen Temperaturen. Die bei Thales vorgegebene Temperaturstabilität von $\pm 1^\circ\text{C}$ ist mit dem Lauda Integral XT Thermostaten perfekt einzuhalten. Dies gelingt durch besonders fein abgestimmte Temperieralgorithmen in Verbindung mit der kräftigen, 8-stufigen Vario-Pumpe. Bei Bedarf generiert letztere Durchfluss-Volumina von bis zu 90 l/min Temperiemedium - optimale Voraussetzung auch für den Umgang mit größeren Wärmelasten bei Paralleltests. Die bedienerfreundliche Menüstruktur des Lauda Integral XT gestattet es, selbst komplexe Wechseltemperaturzyklen ohne großen Aufwand in wenigen Schritten und mit komfortabler graphischer Unterstützung zu programmieren (Abb. 7). Optional ist dies auch mittels der Software Wintherm Plus am PC-Bildschirm möglich.

möglich sind, kommt der Simulation ein hoher Stellenwert zu. Derzeit konzentriert sich Thales auf mehrere wichtige Aspekte: die Reduzierung des Gesamtgewichtes der Röhre, die weitere Steigerung der Effizienz, die Multiband-Tauglichkeit mit exzellenter Linearität und die breitbandige RF-Ausgangsleistung. Der wachsende Bedarf an leistungsfähigen Wanderfeldröhren bringt mit sich, dass ein Höchstmaß an Reproduzierbarkeit von Röhre zu Röhre gewährleistet werden muss. Für all diese Optimierungsansätze sind umfangreiche und intensive thermische Belastungsprüfungen erforderlich. Lauda Integral XT Prozessthermostate eignen sich aufgrund ihrer exzellenten Leistungsmerkmale und Langzeit-zuverlässigkeit hierfür in besonderer Weise. Die Versuchsdurchführung der Material- und Funktionstests wird so deutlich effizienter. Für Ingenieure und Techniker verkürzen sich die Entwicklungszeiten. Auch vermindert sich der Zeitaufwand für die routinemäßige Qualitätssicherung in der Serienproduktion. Die optimale Temperiertechnologie trägt somit maßgeblich zur Reduktion der hohen Entwicklungs- und Stückkosten dieser komplexen Systeme bei. Leistungsstarke Hightech-Thermostate von Lauda liefern einen wertvollen Beitrag zu noch mehr Betriebssicherheit und beschleunigen die Prüfverfahren neuer, satellitenbasierter Technologien.

Produktoptimierung von Wanderfeldröhren durch thermische Stresssimulation

Der entscheidende Vorteil rigider thermischer Stressprüfungen besteht darin, Schwachstellen bereits frühzeitig zu detektieren und entsprechende konstruktive Veränderungen am Aufbau der Röhrenarchitektur vornehmen zu können. Da spätere Eingriffe und Korrekturen im All nicht

► KONTAKT

Dr. Michael Seipel
 Produkt Manager Temperiergeräte
 Lauda Dr. R. Wobser GmbH & Co. KG
 Lauda-Königshofen
 Tel.: 09343/503-273
 Fax: 09343/503-283
 michael.seipel@lauda.de
 www.lauda.de