Die zweite Antenne der Satelliten-Bodenstation Leuk: ein Beitrag aus der Sicht des Bauherrenberaters für bauliche und maschinentechnische Aspekte

Autor(en): **Stüssi, Ulirch W. / Widmer, Robert**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **97 (1979)**

Heft 48

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-85588

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die zweite Antenne der Satelliten-Bodenstation Leuk

Ein Beitrag aus der Sicht des Bauherrenberaters für bauliche und maschinentechnische Aspekte

Von Ulrich W. Stüssi und Robert Widmer, Zürich

Der erste Teil des vorliegenden Artikels befasst sich mit der konstruktiven Ausbildung der Antenne und dem Projektablauf. Anschliessend werden einzelne Probleme und ihre Lösung im Zusammenhang mit dem Präzisionsstahlbau und dem Antriebssystem beschrieben. Nach Beleuchtung einiger Spezialgebiete (Erdbebenrisiko, Windbelastung) wird auf die praktizierte Qualitätssicherung eingegangen, die bei derartigen Bauwerken eine besondere Bedeutung erlangt.
Der Artikel ist aus der Sicht des Bauherrenberaters für bauliche und maschinentechnische Aspekte verfasst. Somit bleibt der gesamte fernmeldetechnische Bereich unberücksichtigt.

Die Nachfrage nach *interkontinentalen Übermittlungskanälen* nimmt dauernd zu. Die konventionellen Übertragungskabel, welche die Weltmeere durchmessen, genügen allein den quantitativen Ansprüchen nicht mehr, und viele Länder in Afrika, Asien und Südamerika sind nicht an dieses Netz angeschlossen. Die *Kabel* sind zudem für *Fernsehübertragungen nicht geeignet*. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass im vergangenen Jahrzehnt die weltweite Entwicklung in der Übermittlungstechnik über Satelliten einen ungeahnten Aufschwung nahm.

Durch starke Bündelung von Wellen mittels grosser *Parabolspiegelsysteme* ist es heute möglich, Signale über *geostationäre Satelliten* zu senden, die in einer Höhe von etwa 36 000 km in der Äquatorebene kreisen, und sie mit analogen Empfangseinheiten nach millionenfacher Verstärkung praktisch verzerrungsfrei zu empfangen. Die kommerzielle Telefonie und das Fernsehen sind primäre Benützer dieses Übermittlungssystemes.

Die schweizerischen PTT-Betriebe stiessen im Jahre 1972 mit dem Bau der Bodenstation *Leuk* (Wallis), die eine erste Antenne enthielt, in diesen Bereich der Nachrichtenübertragung vor. Im Moment sind dort *drei Sender* mit je einem Träger in Betrieb, die über einen geostationären Satelliten *Intelsat IV-A der Atlantikregion* Verbindungen zwischen der Schweiz und *Nordamerika, Südamerika, Afrika* sowie dem *Mittleren Osten* ermöglichen. Der Satellit weist eine *Übertragungskapazität* von rund *6000 doppelt belegten Kanälen* (Senden und Empfang) für Telefon/Telex sowie von Kanälen für *zwei Fernsehprogramme* auf, wovon die PTT gegenwärtig etwa 270 doppelt gerichtete Telefonkanäle belegen. Die Zuteilung wird je nach Bedarf laufend kurzfristig angepasst.

Der *Standort* Leuk drängt sich aus verschiedenen Gründen auf. Unter anderem bildet eine *«Sichtverbindung»* mit den geostationären Satelliten über dem Atlantik und dem Indischen Ozean eine unerlässliche Voraussetzung. Zudem muss die Antenne *gegen radioelektrische Störungen* aus anderen Quellen – z. B. terrestrische Anlagen der drahtlosen Dienste und Industrie – *durch natürliche Hindernisse abgeschirmt* werden; somit kam lediglich ein Standort in einer *Mulde* oder in einem *Gebirgstal* in Frage. Schliesslich mussten die *meteorologischen* Voraussetzungen günstig sein, da Regen die Übertragungsqualität herabmindert. Der Standort Leuk erfüllt diese und weitere Bedingungen in idealer Weise.

In der Zwischenzeit entschieden sich die PTT aus verschiedenen Gründen – Anstieg der Nachfrage, Indienstnahme eines Satelliten mit gesteigerten technischen Systemforderungen (Intelsat V) und dem dadurch notwendigen Umbau der ersten Antenne – für den Bau einer zweiten Antenne auf dem Areal der Bodenstation Leuk. Die *erste Antenne* wurde als *Joch-Turm-System* konzipiert (Yoke and Tower), d. h. der Parabolspiegel (⌀29,6 m) ist über ein einziges Lager mit dem Betonsockel verbunden. Die *zweite Antenne* ist nach ähnlichen übermittlungstechnischen Gesichtspunkten ausgelegt; als *Rad-Schiene-Antenne* (Wheel and Track) ist sie jedoch etwas einfacher gelagert (Bild 1). Der *Unterschied* zwischen den beiden Systemen liegt darin, dass die Sende- und Empfangsverstärker bei der Joch-Turm-Antenne auf der Höhe des Parabolspiegels angeordnet sind, während sie sich bei der Rad-Schiene-Antenne im Betonsockel befinden; ihre leichtere Zugänglichkeit wirkt sich betrieblich sehr vorteilhaft aus. Der Preis für die einfachere, betriebsgerechtere Lösung bei der Rad-Schiene-Antenne ist allerdings in Form einer *höheren Fertigungsgenauigkeit der Spiegeltragkonstruktion*, eines *grösseren Spiegeldurchmessers* (32,0 m statt 29,6 m) und von *extremen Anforderungen an die Formgenauigkeit der Umlenkspiegel* zu bezahlen, die zur periskopartigen Leitung des Signals zwischen den Verstärkereinheiten und dem Parabolspiegel erforderlich sind.

Die Übertragungscharakteristiken sind bestimmend für die hohen Genauigkeitsanforderungen an die Konstruktion. Als Neuerung gegenüber der ersten Antenne ist sowohl das radioelektrische Sende- als auch das Empfangssignal links- und rechts-zirkularpolarisiert. Dies bedeutet praktisch eine *Verdoppelung der verfügbaren Bandbreite* und damit der Übermittlungskapazität. Die Trägerfrequenzen betragen rund 6 GHz für das Sende- und rund 4 GHz für das Empfangssignal. Um eine klare wellenmässige Trennung dieser vier Kanäle zu erzielen und um den Gewinn der Antenne, d. h. die von der Antenne bzw. dem Satelliten empfangene Signalintensität möglichst gross zu halten, sind die erwähnten hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Antenne zu stellen. Es geht dabei sowohl um die *Herstellungsgenauigkeit der Konstruktion* als auch um ihre *Steifigkeit unter den Einwirkungen von Windlasten und Eigengewicht bei verschiedenen Anstellwinkeln des Parabolspiegels*.

Das Projekt

Antennensystem

Anhand eines Anfangs 1978 durchgeführten Evaluationsverfahrens wurde ein japanisches Antennensystem ausgewählt (Bild 2). Wesentlichstes Merkmal der Antenne ist der *Hauptspiegel*, dessen Tragkonstruktion als *aufgelöstes feingliedriges Raumfachwerk mit schalenartiger Tragwirkung* ausgebildet ist. Damit wird eine grosse Steifigkeit und Formbeständigkeit erreicht. Der eigentliche parabolische Reflektor besteht aus *180 Aluminiumelementen*, die justierbar auf die Tragkonstruktion aufgeschraubt sind. Der *Nebenspiegel* im Brennpunkt des Parabolspiegels, eine *Kunststoff-Präzisionsfläche*, ist über einen Vierfuss mit der Spiegeltragkonstruktion verbunden. Der Hauptspiegel ist oben an der Fusskonstruktion in zwei Elevationslagern geführt und lässt sich aus der horizontalen in die vertikale Position um rund 90° drehen. Die Fusskonstruktion ist als verwindungssteifes Raumfachwerk konzipiert und leitet die auf die Elevationslager wirkenden Kräfte in das Azimutlager (Horizontalkräfte) und über die vier Räder auf die Schiene weiter. Die Azimutantriebe befinden sich direkt an zwei der vier Räder. Die Antenne lässt sich in Azimutrichtung um ∓170° drehen. Die Signalführung leitet das elektromagnetische Signal von den Verstärkereinheiten im Stahlbetonsockel zum Hauptspiegel. Aus kinematischen Gründen

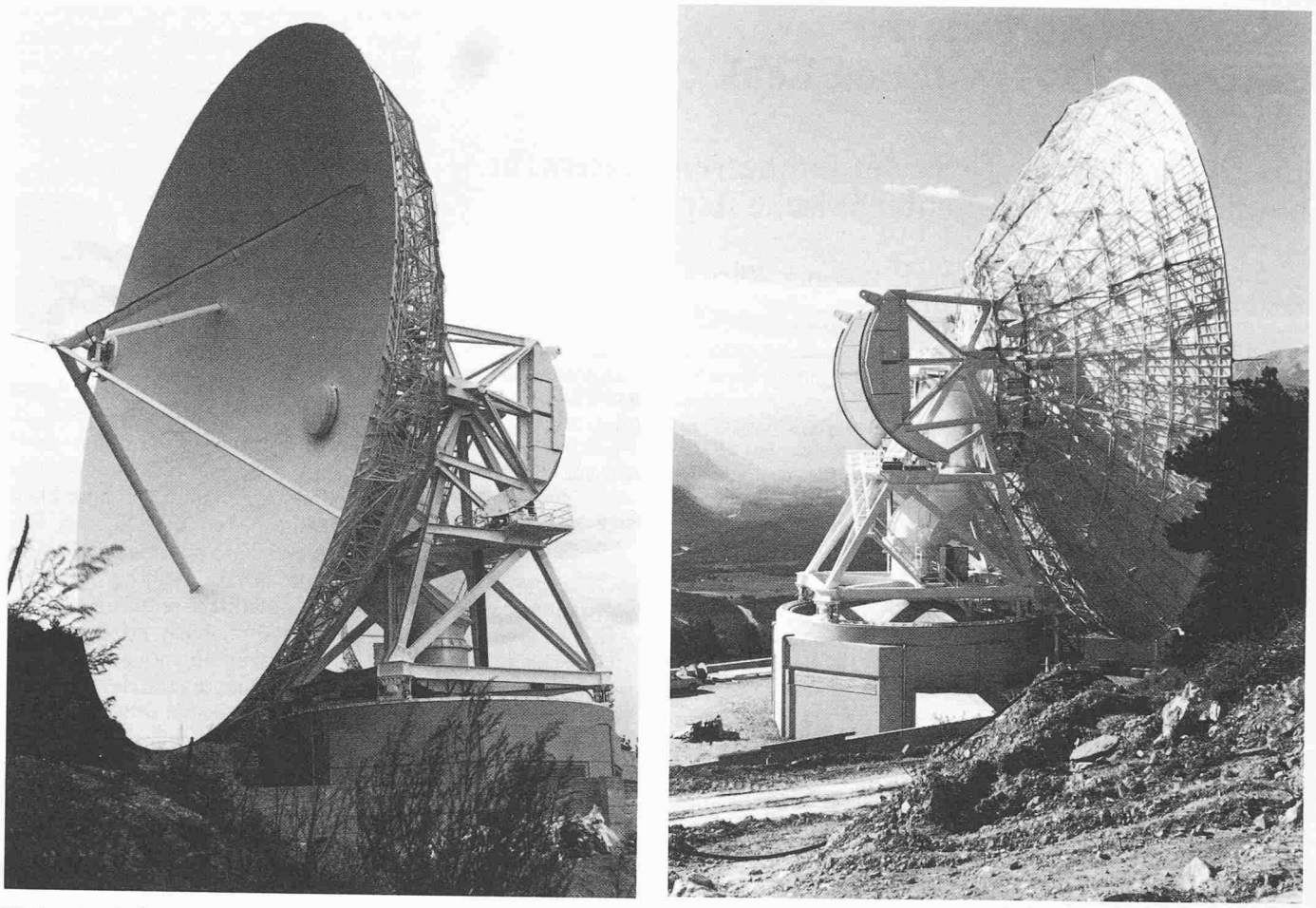


Bild 1. Ansicht der Rad-Schiene-Antenne (Wheel and Track) der PTT-Bodenstation Leuk nach Beendigung der Montage

(Elevationsbewegung der Antenne) ist die rohrförmige Signalführung geknickt ausgeführt und das Signal wird an vier Präzisionsspiegeln umgelenkt. Der *Stahlbetonsockel* übernimmt einerseits die Lasten der Antenne, andererseits enthält er die Verstärkereinheiten der Sender und Empfänger sowie die zugehörigen Kühl- und Klimageräte. Um einen ganzjährigen, unterbruchslosen Betrieb zu gewährleisten, sind Hauptspiegel, Nebenspiegel, Signalführung und Fahrwerk mit einem *Enteisungssystem* versehen. Für die gesamte Konstruktion wurde die Stahlsorte St 37-2 verwendet. Das Gewicht des Hauptspiegels beträgt rund 1050 kN, das der Gesamtantenne (ohne Stahlbetonsockel) 2670 kN. Der Korrosionsschutz bildete ein besonderes Problem, auf das im Abschnitt «Präzisionsstahlbau» näher eingegangen wird.

Die beiden Rotationsfreiheitsgrade um die horizontale Elevationsachse und die vertikale Azimutachse erlauben der Antenne, einem vom Standort Leuk erreichbaren Satelliten zu folgen. Die Fernmeldesatelliten sind jedoch geostationär, d. h. sie führen lediglich eine minimale Bewegung um ihren Standort aus. Damit liegen die *permanenten Nachführbewegungen* der Antenne *im Bereich von Bogensekunden* und sind von Auge nicht mehr wahrnehmbar. Dieser Sachverhalt stellt besondere Anforderungen an die Antriebssysteme, auf die später eingegangen wird.

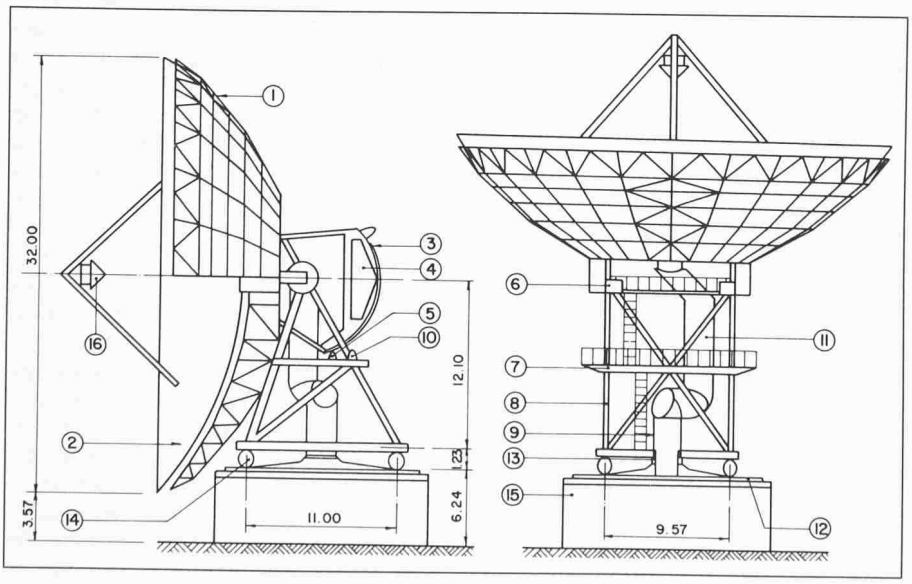


Bild 2. Die Hauptelemente der Antennenkonstruktion

① Spiegeltragkonstruktion
② Reflektorplatten
③ Elevations-Zahnkranz
④ Gegengewicht
⑤ Elevationsantrieb
⑥ Elevationslager
⑦ Plattform und Treppen
⑧ Fusskonstruktion
⑨ Kabelraum
⑩ Sturmsicherung
⑪ Signalführung
⑫ Schiene
⑬ Azimutlager
⑭ Azimuträder
⑮ Stahlbetonsockel
⑯ Nebenspiegel

Genereller Projektablauf

Auftraggeber der Antenne waren die schweizerischen PTT. Als *Bauherrenberater* wurde ein *PTT-externes Team* gebildet, das für die Fachbereiche Stahlbau, Stahlbetonbau, Bodenmechanik und Fundationstechnik, Strukturdynamik, Maschinenkonstruktion, Regelungstechnik, Klimatechnik, Korrosionsschutz und Qualitätssicherung zuständig war. Die Erstellung der Antenne wurde einer japanischen Fernmeldeunternehmung übertragen. Dieselbe Unternehmung erstellte bereits die erste Antenne in Leuk und wies sich in jeder Beziehung als führend in der Branche aus. Die Stahlkonstruktion wurde durch eine schweizerische Stahlbauun-

ternehmung, der Sockel durch eine Walliser Baufirma, beide als Unterakkordanten des japanischen Unternehmens, erstellt, während sowohl die elektronischen als auch die mechanischen Elemente in Japan hergestellt wurden.
Der Projektablauf war durch *vier Phasen* gekennzeichnet. In der *ersten Phase* bestand die Tätigkeit des Bauherrenberaters darin, die *eingereichten Offerten zu bewerten*. Auswahlkriterien bildeten dabei die technische Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit, die Seriosität des Generalunternehmens hinsichtlich Planung, Ausführung und weiteren Dienstleistungen sowie die Kosten der Anlage. Nachdem eine deutsche Offerte vorzeitig zurückgezogen wurde, kam es zum direkten Vergleich zwischen dem japanischen Produkt und einer italienischen Antenne.
In der *Phase 2* war Gelegenheit geboten, die *definitive Auslegung des Antennensystems detailliert zu begutachten* und, wo notwendig, an schweizerische Verhältnisse und Normen anzupassen oder zu verbessern. Erfahrungen für diese Beurteilung konnten aus dem Betrieb der Antenne 1 sowie bei Besichtigungen bestehender Antennen im Ausland gewonnen werden. Während der *Phase 3* stand für das Beraterteam die *Qualitätssicherung auf Stufe Bauherr* im Vordergrund, die systematisch und konsequent wahrgenommen wurde (vgl. Abschnitt «Qualitätssicherung»). In *Phase 4* ging es hauptsächlich darum, die *Abnahmetests* zu begutachten und die Erfüllung der entsprechenden, vertraglich fixierten Grundforderungen sicherzustellen.

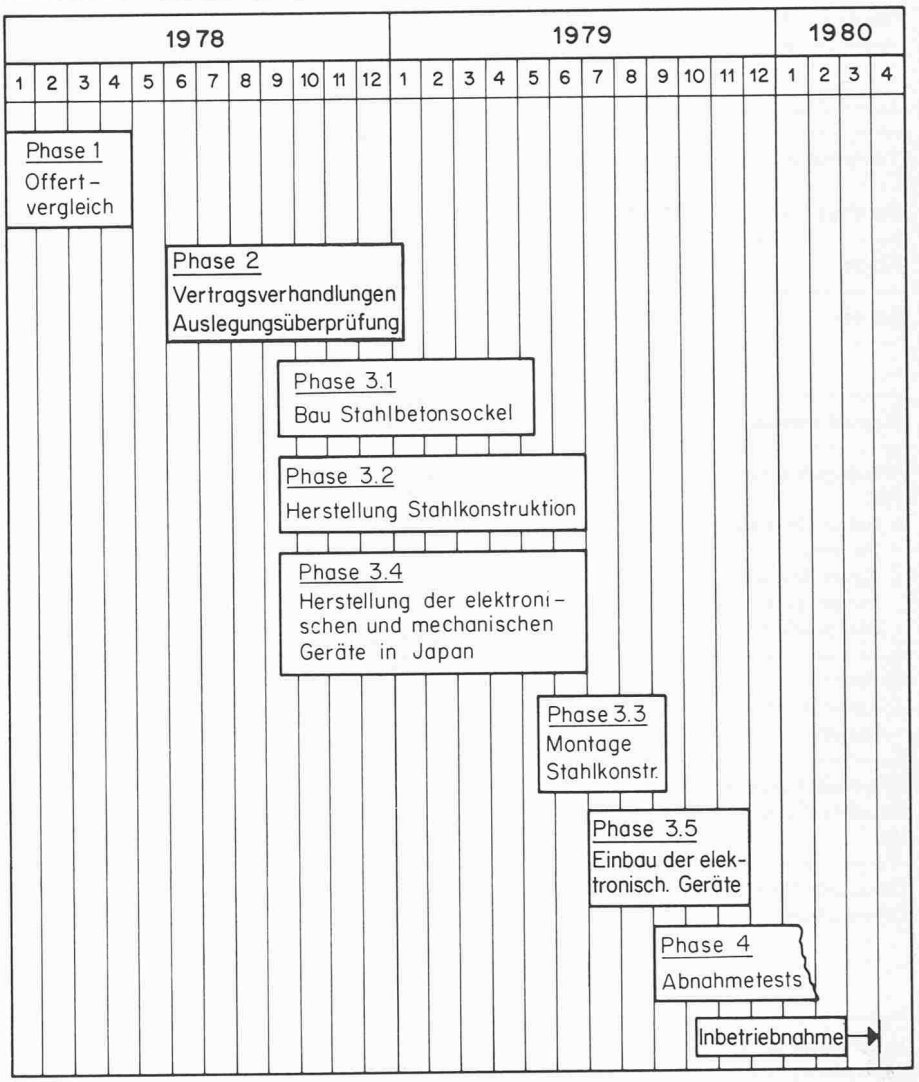


Bild 3. Zeitlicher Projektablauf mit den vier Phasen Offertvergleich, Vertragsverhandlung, Herstellung und Abnahmetests

Generelle Anforderungen an das Antennensystem

Die äusseren Einflüsse Wind, Sonneneinstrahlung, Regen und Eigengewicht beeinflussen die Übertragungsqualität massgeblich. Zudem ist die Standfestigkeit der Antenne unter Wind und Erdbebenlasten sicherzustellen. Die *Übertragungsqualität* hängt u. a. direkt mit der *Formgenauigkeit des Hauptspiegels* zusammen. Um eine verzerrungsfreie Übertragung zu gewährleisten, darf dabei die mittlere Formabweichung des Hauptspiegels, gemessen als gemittelte Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate ausgewählter Spiegeldeformationen, nicht mehr als 1,6 mm betragen bei einer Windstärke von 20 m/s und Böen bis 27 m/s. Dieses Mass ist auf die bestmöglich angepasste Paraboloidoberfläche für den gegebenen Arbeitselevationswinkel zu beziehen, wobei die Einflüsse des Eigengewichtes bereits durch Nachstellen der Verstellschrauben der Spiegelfläche teilweise kompensiert sind. Der angegebene Wert soll einen Anhaltspunkt für die Genauigkeitsanforderungen an die Herstellung der Stahlkonstruktion geben. Weitere wesentliche Auslegungsanforderungen sind in Tabelle 1 enthalten.

Präzisionsstahlbau

Projektierung

Das gesamte Antennensystem wurde durch die japanische Generalunternehmung projektiert. Dadurch war es notwendig, eine Anpassung der Auslegung an die schweizerischen Normen und an die europäischen Profilabmessungen vorzunehmen. Beanspruchungsmässig bot die Anpassung an die Stahlbaunorm SIA 161 keine Schwierigkeiten, da die Antenne auf extreme Formeinhaltung und nicht auf maximale Spannungsausnützung ausgelegt ist und zum anderen die japanische Norm ähnliche Sicherheitsfaktoren wie die schweizerische Stahlbaunorm vorschreibt. Für die Herstellungsgenauigkeit der Stahlkonstruktion wurden *besondere Toleranzen* festgelegt. Beispielsweise durfte der Radius des Mittelteils der Spiegeltragkonstruktion lediglich um ±2,5 mm vom Sollwert von 6130 mm abweichen, was deutlich unter den in der SIA-Norm 161 festgelegten Toleranzen liegt.

Herstellung durch die schweizerische Stahlbauunternehmung

Die *Fertigungsgenauigkeit* sowie der *Korrosionsschutz* bildeten die Besonderheiten bei der Herstellung gegenüber dem normalen Stahlhochbau. Um die geforderten Toleranzen einzuhalten, mussten sowohl das Hauptspiegeltragwerk als auch die gesamte Fusskonstruktion vollständig im Werk montiert, ausgemessen und justiert werden (Bild 4). Diese unkonventionelle Aufgabe erforderte neben einem ausgeprägten Qualitätsbewusstsein einige Anpassungsfähigkeit aller Beteiligten im Werk.
Sowohl die PTT als auch der japanische Generalunternehmer stellten hohe Ansprüche an den *Korrosionsschutz*. In Tabelle 2 sind die Komponenten des gewählten Anstriches detailliert aufgeführt. Diese Anstrichkomponenten erfüllen erfahrungsgemäss hohe Anforderungen bezüglich *Abriebfestigkeit* und *Beständigkeit*, sie sind jedoch heikel aufzubringen. Insbesondere der Zink-

Tabelle 1. Wesentliche Auslegungsanforderungen an das Antennensystem

Lebensdauer	20 Jahre
Temperaturbereich	−30 °C bis +40 °C
Feuchtigkeit	15% bis 100%
Regen	100 mm/Std
Schnee	10 cm/Std bzw. 30 cm/Tag Maximalhöhe 80 cm
Sonnenintensität	1.2 kW/m²
Windgeschwindigkeit - Betrieb in jeder Position - Keine Beschädigungen in der Vertikalposition	 33 m/s 53 m/s
Erdbeben - Keine Beschädigungen	0.3 g Horizontalbeschleunigung
Minimale Resonanzfrequenz der Antenne	2.0 Hz
Gemittelte Spiegeldeformation	1,6 mm maximal bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und Böen bis 27 m/s
Unterschied in der tatsächlichen Ausrichtung des Spiegels und der diesbezüglichen Instrumentenanzeige	0.05° maximal bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und Böen bis 30 m/s
Nachführfehler des Spiegels (Winkel zwischen dem Leitsignal des Satelliten und der Hauptachse der Antenne)	0.015° maximal bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und Böen bis 30 m/s

Tabelle 2. Korrosionsschutz der Stahlkonstruktion

Anstrich		*Schichtstärke*
Feuerverzinkung oder Sandstrahlen + Zinkstaubfarbanstrich:		85 µm
Amercoat Nr. 6		65–125 µm
Haftanstrich:	Metalact H 5	4– 8 µm
Grundanstrich:	Rubbermarine CP primer coating	25– 40 µm
1. Decklack:	Rubbermarine undercoat	25– 40 µm
2. Decklack:	Rubbermarine topcoat	25– 40 µm

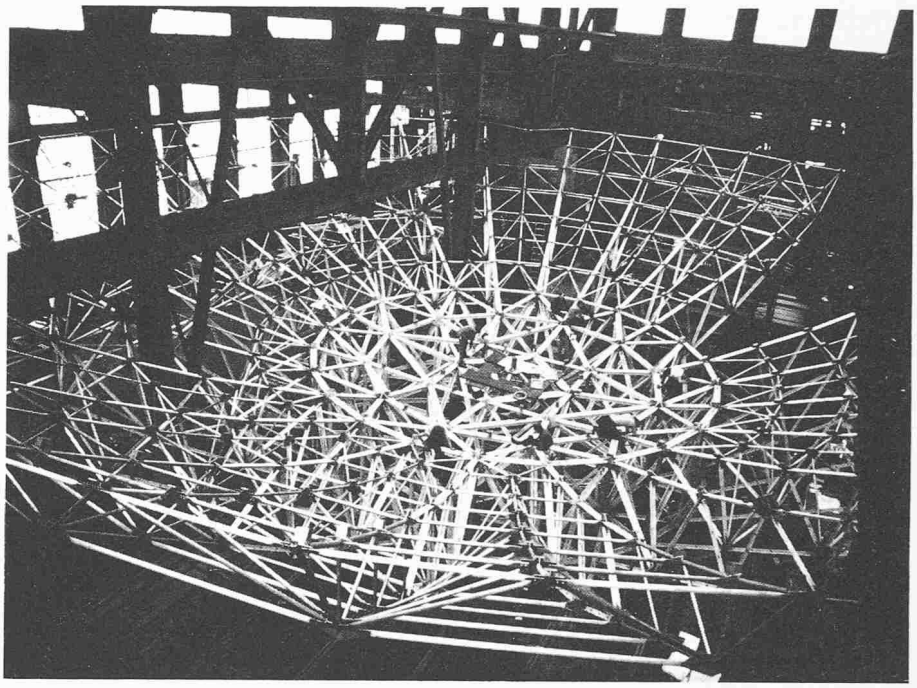


Bild 4. Werkmontage der Hauptspiegel-Tragstruktur. Im Zentrum die Vermessungsgeräte zum Ausmessen der Struktur. Im Vordergrund sind die Anschlusskonsolen für die Aluminium-Spiegelelemente sichtbar (Aufnahme: von Roll)

staubfarbanstrich, Amercoat Nr. 6, kann nur durch erfahrene Spezialisten einwandfrei aufgebracht werden. Luftfeuchtigkeit, Mischdauer, Lagerungszeit der Farbe, Spritzgeräte und Schichtstärke beeinflussen in überdurchschnittlicher Weise die Qualität des Anstriches.

Montage

Die Montage wurde durch den Hersteller der Stahlkonstruktion vorgenommen. Die Montagezeit der Stahlkonstruktion inkl. Schiene betrug rund 14 Wochen. Während dieser Zeit wurde auch der gesamte Deckanstrich auf der Baustelle aufgebracht. Im Prinzip wurde die Fusskonstruktion konventionell auf der Baustelle montiert, während die Hauptspiegel-Tragkonstruktion segmentweise am Boden zusammengebaut und anschliessend mittels eines Autokrans versetzt wurde. Dabei erfolgte die Montage der Hauptspiegel-Tragkonstruktion in vertikaler Position, d. h., die Spiegelachse war vertikal nach oben gerichtet. Der zentrale, zylinderförmige Teil der Hauptspiegel-Tragkonstruktion (vgl. Bild 4) bildete mit rund 240 kN die schwerste zu versetzende Einheit und erforderte aus geometrischen Gründen den gleichzeitigen Einsatz von zwei Autokranen.

Obwohl die Fusskonstruktion und die Hauptspiegel-Tragkonstruktion bereits im Werk montiert und justiert wurden, ergaben sich auf der Baustelle teilweise *neue, unerwartete Formabweichungen*. Sie waren eine Folge der *geänderten Auflagerverhältnisse;* sie ergaben sich aber ebenso daraus, dass auch bei Verwendung von Passbolzen für die Montage infolge des noch so kleinen Spieles beim erneuten Zusammenbau *nicht mehr die exakt gleiche Geometriekonfiguration wie im Werk erreicht werden kann*. Dies kommt bei den vorliegenden Toleranzen natürlich besonders stark zum Ausdruck.

Als *Korrekturmassnahmen* mussten, neben der Verwendung von *Unterlagsplättchen*, vereinzelt auch *unerwünschte Neubohrungen* vorgenommen werden. Dass die geforderten Toleranzen nicht nur knapp, sondern zum Teil auch gut eingehalten werden konnten, ist am Beispiel des Nebenspiegels ersichtlich. Der Nebenspiegel befindet sich bei vertikaler Spiegelposition rund 35 m über der Zentrumsmarke im Boden des Stahlbetonsockels. Bei einer tolerierten seitlichen Abweichung von der vertikalen Linie durch diese Zentrumsmarke von 2 mm betrug der gemessene Wert lediglich 0,3 mm. Dieser Wert beweist nicht nur das Können des schweizerischen Stahlbaues, sondern lässt auch den Aufwand ahnen, der hinsichtlich Präzision an diesem Bauwerk zu treiben war. Gerade dieser Umstand ist es, der diesem Bauwerk den Stempel des Aussergewöhnlichen aufdrückte. Als Verbindungsmittel wurden der Formtreue wegen ausschliesslich HV-Schrauben verwendet. Generell waren, vor allem aus Gründen der Korrosionsbeständigkeit (Verletzung der Feuerverzinkung), keine Montageschweissungen erlaubt.

Das Antriebssystem

Allgemeines

Der Parabolspiegel der Antenne Leuk 2 weist in seiner Hauptstrahlungsrich-

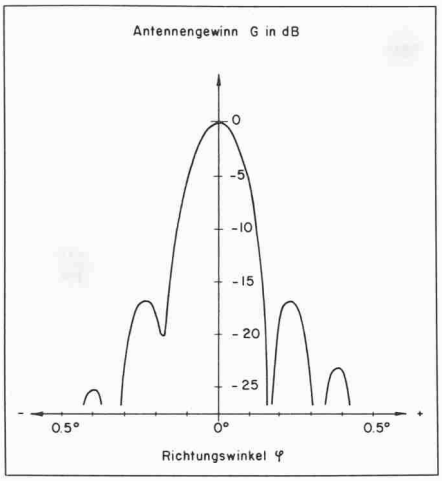


Bild 5. Antennengewinn G in Funktion des Richtungswinkels φ (Richtfehler)

tung hervorragende radioelektrische Eigenschaften auf. Verglichen mit einem isotropen Strahler (Kugelstrahler) beträgt der Antennengewinn dieses Systems mehr als 60 dB, was einem Leistungsverhältnis von rund $1:10^6$ entspricht. Die ausgeprägten Verstärkungseigenschaften solcher Parabolspiegelsysteme reagieren jedoch sehr empfindlich auf Abweichungen des Hauptspiegels von seiner optimalen Lage. Schon ein Richtfehler von 0.1^0 würde die Empfangsleistung der Antenne auf weniger als die Hälfte des Maximalwertes reduzieren (Bild 5). Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an das Antriebssystem der Antenne, das den Hauptspiegel – mit minimalen Toleranzen – dem Satelliten nachführen muss.

Antriebskonzept

Die Antenne Leuk 2 ist ein *orthogonales Zweiachssystem*. Eine feste, vertikale und eine bewegliche, horizontale Achse ermöglichen die Azimut- bzw. die Elevationsbewegungen des Hauptspiegels.

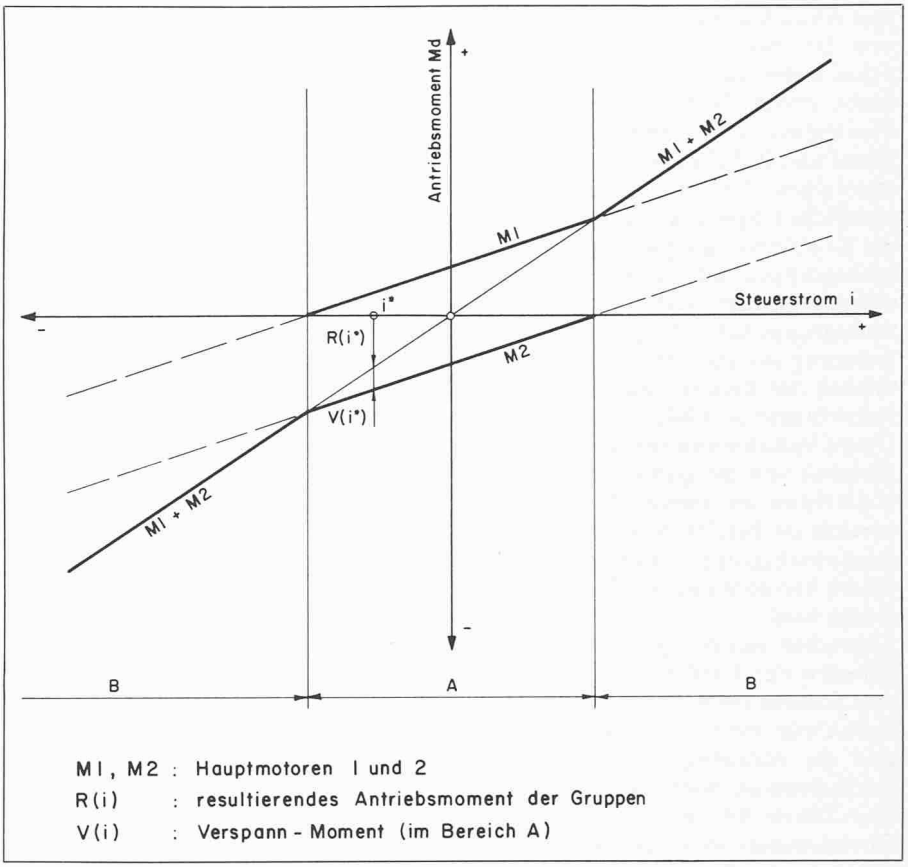


Bild 7. Drehmomentverlauf des Servo-Antriebssystems

Vier an der Fusskonstruktion befestigte Räder rollen auf der auf dem Stahlbetonsockel montierten, kreisförmigen Schiene ab und bilden das axiale Lager der Azimutbewegung. Ein zentrales Wälzlager – das Azimutlager – leitet die radialen Führungskräfte dieser Drehachse in den Stahlbetonsockel weiter (vgl. Bild 2).

Auf der Rückseite des Hauptspiegels befindet sich die horizontale Elevationsachse, die durch zwei Wälzlager (Elevationslager) geführt ist. Die Lagerböcke der Elevationslager sind auf der oberen Plattform der Fusskonstruktion befestigt. Gegengewichte an den Scheiben der Elevations-Zahnkränze gleichen das statische Moment des Hauptspiegels bezüglich der Elevationsachse aus.

Jeder Drehachse sind zwei Antriebsgruppen zugeordnet, die den Hauptspiegel in die geforderte Lage bringen (Bild 6). Im Normalfall (Auto Tracking Mode) arbeiten die im Servosystem integrierten Hauptmotoren; in Ausnahmesituationen kann die Antenne entweder mit dem elektrischen Hilfs- oder dem Handantrieb gerichtet werden.

Während das Antriebsmoment der Azi-

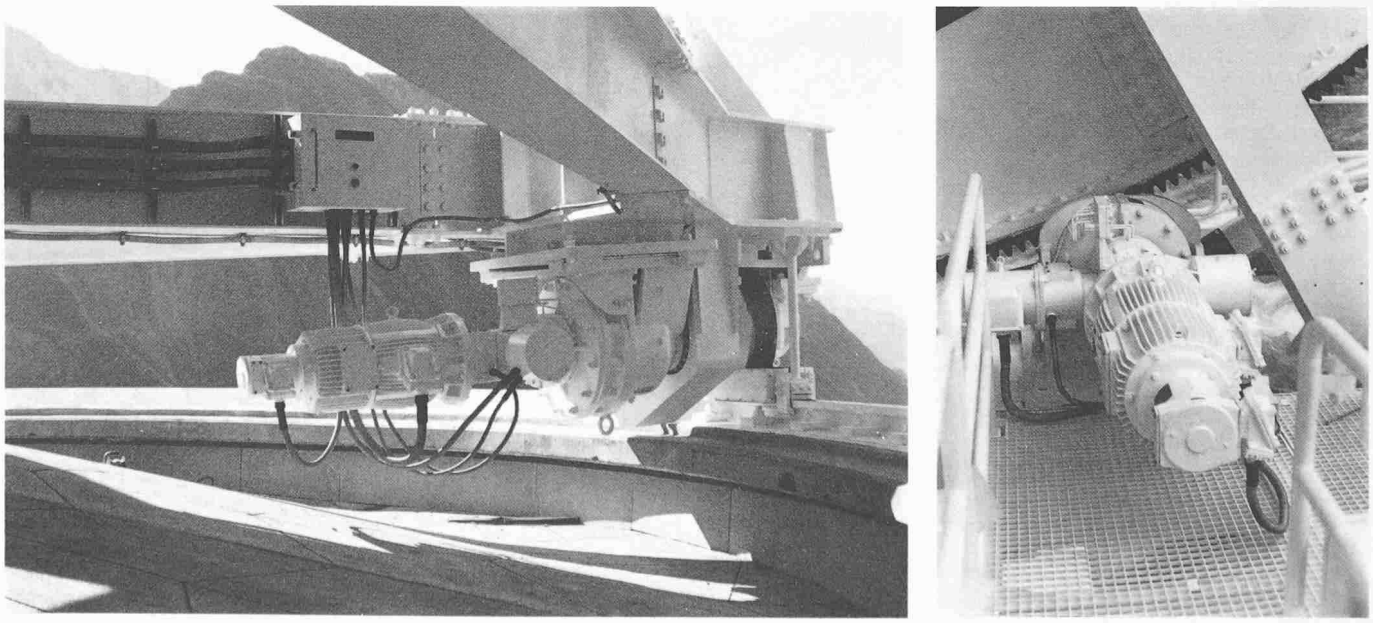


Bild 6. Antriebsgruppen für Azimut- und Elevationsbewegung

mut-Antriebsgruppen kraftschlüssig von den beiden Triebrädern auf die Schiene übertragen wird (Adhäsionsantrieb), erfolgt die Kraftübertragung im Elevationssystem formschlüssig über Ritzel und Zahnkranz. Um die bei mechanischen Antriebselementen unvermeidlichen Spiele auszuschalten, sind die Kraftübertragungselemente der Antriebsgruppen jeder Drehachse gegenseitig verspannt, das heisst eine Antriebsgruppe führt die geforderte Lageänderung aus und überwindet dabei zusätzlich das Bremsmoment der zweiten Antriebsgruppe (Bild 7, Bereich A). Dieses Verfahren sichert die Reaktionsfähigkeit und die Genauigkeit des Servoantriebes im unteren Drehmomentbereich; im Bereich B (Bild 7) arbeiten die Antriebsgruppen parallel, wobei die innere Verspannung durch eine äussere ersetzt wird.

Abgesehen von den spezifischen Unterschieden der Kraftübertragung - Rad und Schiene beim Azimut-, Ritzel und Zahnkranz beim Elevationsantrieb - sind die Antriebsgruppen der beiden Drehachsen grundsätzlich gleich aufgebaut. Die im Abschnitt «Evaluation der Elevationsantriebe» enthaltenen Erläuterungen gelten weitgehend auch für die Azimut-Antriebsgruppen, so dass auf ihre ausführliche Beschreibung verzichtet werden kann.

Leistungsanforderungen

Die von den drei Antriebssystemen zu erbringenden Leistungen für Azimut- und Elevationsachse sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3. Leistungsanforderungen für Azimut- und Elevationsantriebe

Servosystem Bandbreite	0.7 Hz
Störverhalten	siehe Abschn. «Servosystem»
Nachführfehler (Traking Error) bei einer Windgeschwindigkeit von 20/30 m/s	$\|ET\| \leq 0.015°$
Winkelgeschwindigkeiten - Richten und Nachführen - Schwenken	 $\omega = 0.001 \div 0.3°/s$ $\omega = 0.3°/s$
Winkelbeschleunigung - Richten und Nachführen - Schwenken	 $\dot{\omega} = 0.3°/s^2$ $\dot{\omega} = 0.3 \div 0.02°/s^2$
Elektrischer Hilfsantrieb Winkelgeschwindigkeit bei einer Windgeschwindigkeit von 13 m/s	$\omega = 0.01°/s$
Manueller Hilfsantrieb Kraftbedarf bei einer Windgeschwindigkeit von 13 m/s	F = 50 N

Steuerungs- und Servosystem

In der Antennen-Kontrolleinheit (Bild 8, oben) sind alle notwendigen elektrischen und elektronischen Subsysteme enthalten, um die Bewegungen des Hauptspiegels zu steuern, zu regulieren und zu überwachen.

Folgende *Betriebsarten der Antenne* sind möglich und werden durch die entsprechende Stellung des Schalters MS (Mode Selector) vorgewählt:

1. STANDBY MODE → Antriebssystem betriebsbereit
2. AUTO TRACKING MODE → Automatische Nachführung des Hauptspiegels
3. MANUAL POSITION MODE → Manuelle Eingabe der Lagewinkel-Fehlersignale
4. SLEW MODE → Manuelle Steuerung der Schwenkgeschwindigkeiten
5. PROGRAM TRACKING MODE → Programmierte Steuerung der Hauptspiegel-Bewegungen über eine externe Steuereinheit (PT)
6. STOW MODE → Schwenken des Hauptspiegels in die vertikale Lage
7. TEST MODE → Einspeisen von Testsignalen
8. MANUAL OVERRIDE MODE → Übergang von MANUAL POSITION zu AUTO TRACKING MODE

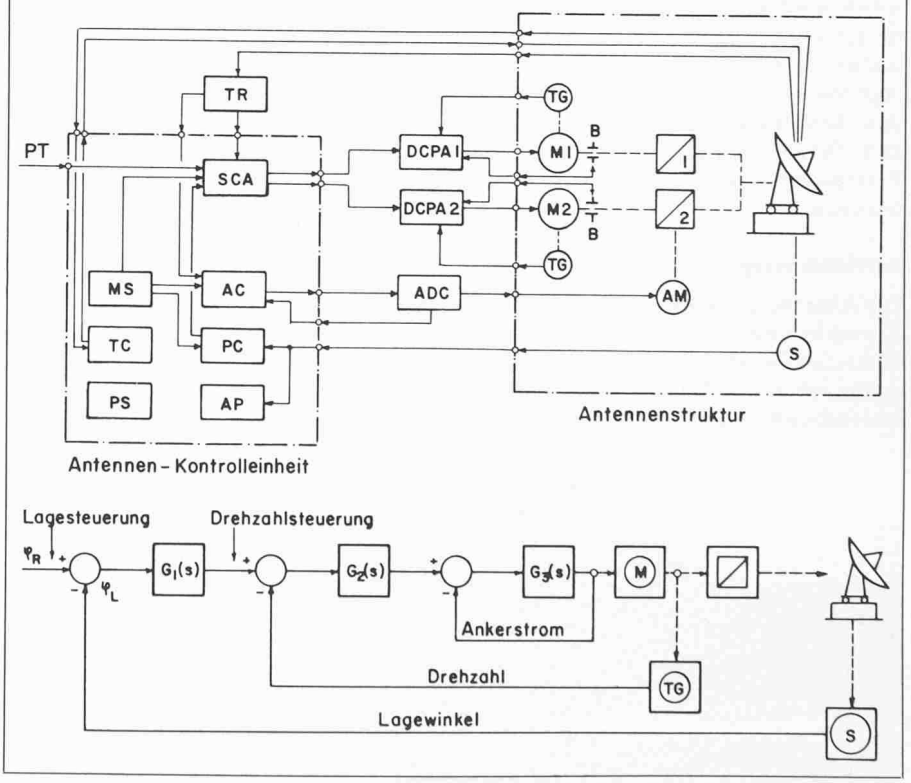


Bild 8. Vereinfachte Blockschemata der Steuerungs- und Servosysteme (nur eine Achse dargestellt)

Die Betriebsart 2 «Auto Tracking Mode» stellt den Normalfall dar. Das von der Antennenspeisung herrührende Signal über die Fehlstellung des Hauptspiegels gelangt über den Nachführ-Verstärker TR (Tracking Receiver), den Servo-Regelungsverstärker SCA (Servo Control Amplifier) zu den Antriebs-Leistungsverstärkern DCPA 1 und 2 (Drive Control Power Amplifier), welche die Hauptmotoren M1 und M2 ansteuern. Die Rückkopplung der Motorendrehzahlen erfolgt über die Tachogeneratoren TG. Die Getriebe 1 und 2 transformieren Drehzahl und Drehmoment der Hauptmotoren auf die erforderlichen Werte. Über den Winkelgeber S (Synchro) wird der Istwert der Hauptspiegellage über die Lagesteuerung PC (Position Control) rückgemeldet und digital angezeigt (AP, Antenna Position).

Der Hilfsmotor AM (Auxiliary Motor) mit den zugehörigen Steuerungs- und Überwachungsorganen (ADC/AC), die Kontrollinstrumente der Antennennachführung TC (Tracking Control) und die Stromversorgung PS (Power Supply) vervollständigen das System.

Das Servosystem (Bild 8, unten) verstärkt und transformiert das in den Servo-Regelungsverstärker (SCA) eingespeiste elektrische Lagewinkel-Referenzsignal φ_R über die Antriebs-Lei-

stungsverstärker (DCPA) auf das für die Betätigung des Stellgliedes (Hauptmotoren, Reduktionsgetriebe) erforderliche Niveau. Prinzipiell handelt es sich hier um eine Nachlaufregelung, in der der Istwert φ_L der Hauptspiegellage dauernd mit dem Referenz- oder Sollwert φ_R verglichen wird. Die Regelungseinrichtung versucht, jede durch eine auf die Anlage wirkende Störgrösse verursachte Regelabweichung $(\varphi_R - \varphi_L)$ zu beseitigen.

Das verwendete Servosystem gleicht eine Regelabweichung $(\varphi_R - \varphi_L)$ im stationären Zustand (φ_R = c) (im Rahmen der praktischen Realisierbarkeit) vollständig aus. Unter instationären Bedingungen ($\dot{\varphi}_R$, $\ddot{\varphi}_R$, ... $\neq 0$) entsteht eine Regelabweichung $(\varphi_R - \varphi_L)$, die von den entsprechenden Systemparametern c_i abhängig ist:

$$(\varphi_R - \varphi_L) = \frac{\varphi_R}{c_L} + \frac{\dot{\varphi}_R}{c_G} + \frac{\ddot{\varphi}_R}{c_B} + \ldots$$

Für die Bandbreite des Systems von 0.7 Hz (entsprechend 35% der Grundfrequenz des Antennensystems) gelten folgende Werte:

- Lage-Fehlerkonstante $c_L \rightarrow \infty$
- Geschwindigkeits-Fehlerkonstante $c_G > 30\ s^{-1}$
- Beschleunigungs-Fehlerkonstante $c_B > 3\ s^{-2}$

Bei einer konstanten Windgeschwindigkeit von 13 m/s mit Spitzen bis 20 m/s beträgt die Abklingzeit des durch einen Rechteckimpuls angefachten Regelvorganges höchstens 3 Sekunden; dabei überschwingt die Sprungantwort des Systems den stationären Endwert um höchstens 35%. Ein weiteres wichtiges Kriterium, die Stabilität des Regelkreises, ist ebenfalls erfüllt.

Evaluation der Elevationsantriebe

Ein Beispiel aus der ersten Phase des Projektablaufes soll die Bauherrenberatung auf dem maschinentechnischen Sektor illustrieren. In dieser Phase galt es, die von den beiden Offertstellern angebotenen Produkte in technischer Hinsicht zu analysieren, zu vergleichen und zu bewerten. Dieses Vorgehen soll anhand des Subsystems «Elevationsantrieb» näher beschrieben werden. Die Prinzipskizzen der zu vergleichenden Antriebe sowie deren charakteristische Daten sind in Bild 9 enthalten.

Bei *Variante (A)* wirken die Hauptmotoren M1 und M2 über die elektromagnetischen Kupplungen K auf die Antriebswellen der Reduktionsgetriebe G1 und G2. Ritzel auf den Ausgangswellen der Getriebe übertragen das Antriebsmoment auf die Zahnkränze Z1 und Z2, die mit der Spiegeltragkonstruktion verbunden sind. Fallen die Hauptmotoren aus, dann sichert ein Hilfsmotor HM, der über das Verzweigungsgetriebe VG mit der Hauptwelle verbunden ist, eine begrenzte Gebrauchsfähigkeit der Antenne. Falls beide elektrischen Antriebe versagen, ermöglicht eine Handkurbel HK den behelfsmässigen Antrieb des Hauptspiegels um die Elevationsachse. Sowohl der Handantrieb als auch die elektromagnetischen Bremsen B sind über die Verzweigungsgetriebe starr mit der Hauptwelle gekoppelt.

Variante (B) besitzt vier Hauptmotoren (M1, M2, M1', M2'), deren Einsatz von der geforderten Winkelgeschwindigkeit um die Elevationsachse bestimmt wird. Im Normalfall (Auto Tracking Mode) arbeiten die Motoren M1 und M2; sie treiben über die Getriebe G1/G2, die Motoren M1'/M2' und die Getriebe G1'/G2' die beiden Ritzel an, die in den (einzigen) Zahnkranz Z eingreifen. Rasche Drehbewegungen werden durch die Motoren M1' und M2' ausgeführt, wobei gleichzeitig die elektromagnetischen Kupplungen K die Getriebe G1 und G2 von der Hauptwelle abtrennen, um Überdrehzahlschäden an den Motoren M1, M2 und HM zu vermeiden. Ähnlich wie bei Variante (A) gewährleisten ein Hilfsmotor HM und ein Handantrieb HK eine reduzierte Gebrauchsfähigkeit der Antenne bei einem Ausfall der Hauptmotoren bzw. des Hilfsmotors. Der Eingriff dieser Hilfsantriebe erfolgt hier über Riementriebe.

Als Grundlage für Bewertung und Vergleich der Elevationsantriebe dienten die PTT-Spezifikationen und eine Liste von «Grundforderungen» (Tabelle 4), die durch die PTT umschrieben und vom Beraterteam definitiv festgelegt worden waren.

Während die PTT-Spezifikation primär die vom System zu erbringenden Leistungen enthält, konzentrieren sich die Grundforderungen auf dessen konzeptionelle und qualitative Aspekte im Blick auf eine lange und störungsfreie Betriebsdauer bei minimalem Unterhaltsaufwand. Der hier skizzierte *Konzeptvergleich* verzichtet auf eine Bewertung der Systeme auf der Basis der PTT-Spezifikationen und beschränkt sich auf einige wenige Punkte der *Grundforderungen*.

Zu Punkt 1: Die Güte einer Regelstrecke wird durch die dynamischen Eigenschaften des Stellgliedes massgebend beeinflusst. Die Hauptmotoren M1 und M2 der Variante (A) - Gleichstrom-Nebenschlussmotoren mit einem kleinen Anker-Schwungmoment - bewegen über ein sehr steifes Getriebe («Cyclo-Drive») den Hauptspiegel.

Bei Variante (B) treiben im Nachführbetrieb (Auto Tracking Mode) die

Bild 9. Prinzipieller Aufbau der beiden Elevationsantriebe

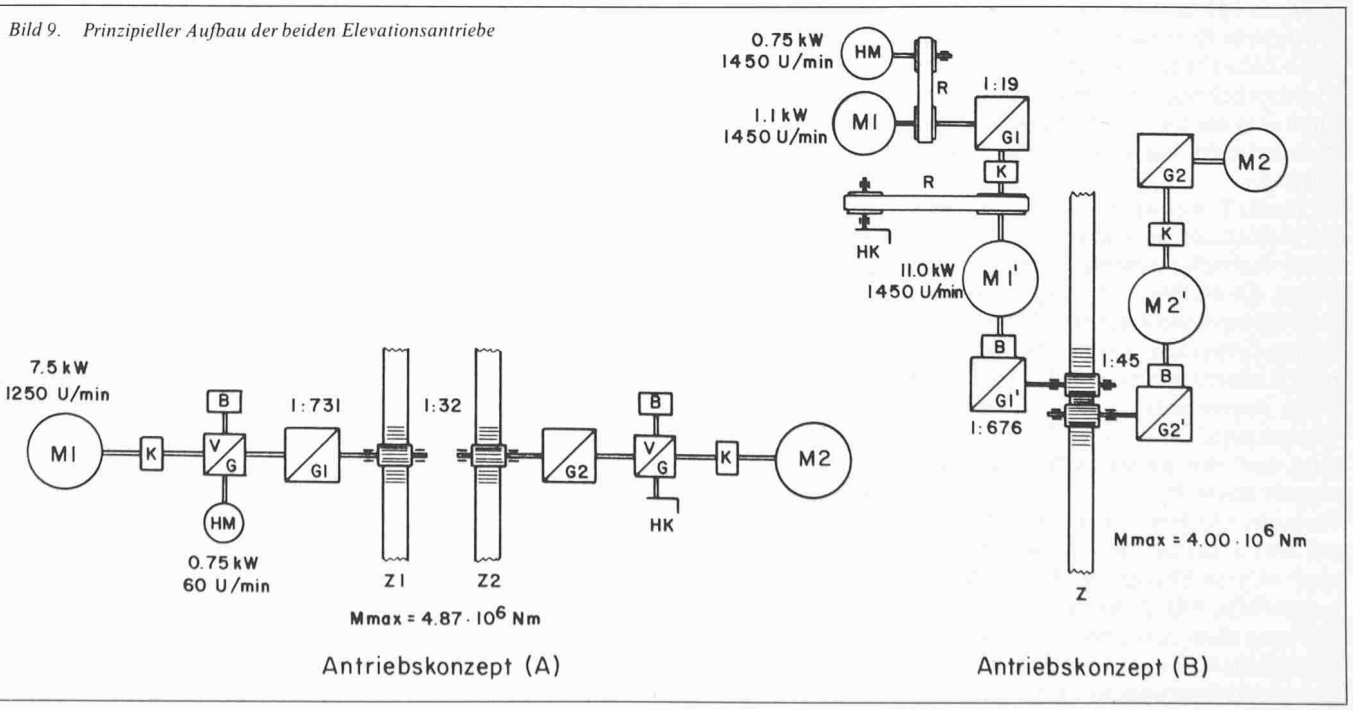


Tabelle 4. Liste der «Grundforderungen»

1. Arbeitsweise (Störanfälligkeit bzw. Empfindlichkeit) des Subsystems unter verschiedenen äusseren Einflüssen wie Wind, Erdbeben, Niederschlag, Sonnenbestrahlung, Temperaturschwankungen usw.
2. Zweckmässigkeit von Konstruktionen und verwendeten Materialien bezüglich Betrieb (normaler Gebrauch, Handling) und Unterhalt
3. Beurteilung der Auswechselbarkeit kritischer Bauteile (Betriebsunterbruch, Ersatzteile)
4. Serviceorganisation der Herstellerfirma und deren Arbeitsweise (organisatorisch, terminlich, Flexibilität) im Fall von gewichtigen Störungen (Betriebsunterbruch, Ersatzteile)
5. Beurteilung der Lebensdauer des ganzen Subsystems sowie kritischer Einzelteile
6. Korrosionsschutz
7. Beurteilung von heute festgestellten unzulänglichen Konstruktionsdetails bezüglich Bedeutung und Aufwand für Modifikationen
8. Überprüfung der Schutzmassnahmen gegen Überlastung und Fehlmanipulationen
9. Kontrolle über die Einhaltung von SIA- und SUVA- Vorschriften
10. Qualitativer und quantitativer Vergleich von Richtwerten des arbeitszeit- und materialmässigen Aufwandes für (störungsfreien) Betrieb und Unterhalt (zur Gewährleistung eines störungsfreien Betriebs) in Stunden und Franken
11. Fertigung und Montage (Flexibilität, Anteil einheimischer Arbeitskräfte, Zweckmässigkeit der gewählten Verfahren und Installationen)
12. Beurteilung von Umfang und Zweckmässigkeit der vorgeschlagenen Tests in der Fabrik oder auf der Baustelle
13. Ästhetik

schwach dimensionierten Asynchronmotoren M1 und M2 über je zwei konventionelle Stirnradgetriebe den Elevations-Zahnkranz. Aufgrund des Betriebsverhaltens der verwendeten Motoren und der Gesamtsteifigkeit der Antriebskette ist Variante (A) die bessere Lösung.

Zu Punkt 2: Auffallend ist die Zahl und die Vielfalt der bei Variante (B) verwendeten Antriebselemente. Insgesamt bestehen die beiden Antriebsgruppen aus fünf Elektromotoren (drei Typen), vier Stirnradgetrieben (zwei Typen) und zwei Riementrieben. Die Konstruktion wirkt improvisiert, was sich auf den Wartungsaufwand, die Ersatzteilhaltung und die Reparaturfreundlichkeit negativ auswirkt.

Variante (A) beschränkt sich dagegen auf drei Elektromotoren (zwei Typen), zwei «Cyclo-Drive»- und zwei Kegelradgetriebe. Die gedrungenen Getriebe mit koaxialen An- und Abtriebswellen ermöglichen eine sehr kompakte Bauart der Antriebsgruppen. Ein zentrales Schmiersystem erleichtert deren Wartung.

Zu Punkt 3: Variante (A) ist auch in dieser Beziehung überlegen, da sie weniger Antriebselemente (= Störungsquellen) aufweist, die Antriebsgruppen in vergleichbaren Anlagen erprobt wurden und sich dort bewährten und alle wesentlichen Teile gut zugänglich sind. Bei Variante (B) fällt insbesondere auf, dass bei einer Revision des Motors M1' beide Hilfsantriebe ausfallen würden. Ein Zahnschaden am Elevations-Zahnkranz hätte - im Gegensatz zu Variante (A) - den zeitweiligen Ausfall der Antenne zur Folge.

Die Bewertung aller Vor- und Nachteile der beiden Elevationsantriebe fiel schliesslich zugunsten der (realisierten) japanischen Variante (A) aus.

Auslegung gegen Erdbeben

Erdbebengefährdung

Für die *Auslegung* des Antennensystems wurde durch die PTT eine *maximale horizontale Erdbebenbeschleunigung von 0.3 g* (g = 9,81 m/s², Erdbeschleunigung) auf der Kote des Fundamentes spezifiziert. Dieser Wert entspricht weitgehend der gängigen, weltweiten Praxis bei derartigen Antennentypen. Damit lässt sich aber unmittelbar die Frage formulieren, welches Erdbebenrisiko am Standort Leuk damit abgedeckt ist, oder konkret, mit welcher Wahrscheinlichkeit dieser Wert einmal während der Lebensdauer der Antenne überschritten wird. Diese Frage soll nachstehend generell beleuchtet werden.

Für die quantitative Ermittlung der Erdbebengefährdung werden heute immer mehr die auf statistischen Grundlagen basierenden *Risikoanalysen* herangezogen. Dabei ist die Belastungseingabe (Bemessungsparameter) stets verknüpft mit ihrer *Eintretenswahrscheinlichkeit*. Für die *Schweiz* wurden vor kurzem die neuen Erdbeben-Risikokarten veröffentlicht [1], die an jedem Ort in der Schweiz den Zusammenhang zwischen der Erdbebenintensität und deren Eintretenswahrscheinlichkeit angeben. Die Intensität eines Erdbebens, welche die an der Erdoberfläche beobachteten Auswirkungen beschreibt, ist für die direkte Verwendung als Bemessungsparameter eines Gebäudes nicht geeignet, wohl ist sie aber jene Grösse, die den vom ingenieurmässigen Standpunkt aus interessierenden «Schadenwirkungen» eines Erdbebens wahrscheinlich am nächsten kommt. Die Korrelation zwischen Intensität und der heute üblicherweise als Bemessungsparameter verwendeten Grundbeschleunigung ist physikalisch nicht exakt möglich, da eine Klassifizierung nach Schadenstufen einer physikalischen Quantität gleichgesetzt werden müsste. Dementsprechend ist die Streuung der Daten in dieser Korrelation gross.

Erdbebenaktivität am Standort Leuk

Um die Erdbebenaktivität des Wallis zu dokumentieren, genügt es, einige Beispiele von Ereignissen zu erwähnen. Zu den *stärksten bekannten Erdbeben im Wallis* zählt das aus dem Jahre 1855 bei *Visp/Brig* (Intensität IX MSK). Noch näher beim Standort Leuk lag das Epizentrum des Bebens von 1946 von *Sion/Sierre* mit Intensität VIII («verbreitete Schäden»). Verglichen mit den übrigen Erdbebengebieten der Schweiz und des Alpenraumes gehört das Wallis zu den *am stärksten aktiven Regionen* (oberer Rheingraben, Cottische Alpen, Schwäbische Alb, Friaul/Kärntner Alpen). Dieses Bild wird von den Risikokarten der Schweiz [1] bestätigt, aus denen z. B. für die jährliche Eintretenswahrscheinlichkeit von 0.0001 eine Intensität von IX.2 bis IX.6 für das Oberwallis resultiert. Ein Ereignis, das etwa der Stärke des Erdbebens vom Mai 1976 im Friaul entspricht, kommt hier also im Mittel etwa alle 10 000 Jahre vor. Aus diesen Risikokarten kann für den Standort der Antenne 2 in Leuk die Beziehung zwischen der Intensität (I_s) und der jährlichen Eintretenswahrscheinlichkeit (p) ermittelt und graphisch dargestellt werden (Bild 10). In derselben Darstellung kann das Risiko dieses Standortes mit dem günstigsten bzw. ungünstigsten Standort der Schweiz verglichen werden. Für den gesamten Intensitätsbereich liegt demnach die Kurve für den Standort Leuk erwartungsgemäss hoch.

Auftretenswahrscheinlichkeit des Auslegungserdbebens

Um nun aus der gegebenen Fundamentbeschleunigung von 0.3 g auf die Auftretenswahrscheinlichkeit zu kommen, wurde über die Beziehung von *Newmark* [2] und auf der Basis der Studie von *O'Brien* et al [3] die Erdbebenintensität ermittelt. Es ergab sich für Korrelations-Mittelwerte und für günstige Baugrundverhältnisse, wie sie am Antennenstandort Leuk vorherrschen, eine Intensität von I_s= VIII.5. Wird dieselbe Rechnung mit Mittelwerten plus eine Standardabweichung (84.1% - Fraktile) durchgeführt, resultiert eine Intensität von I_s VII.9. Damit lässt sich aber aus Bild 10 eine Auftretenswahrscheinlichkeit zwischen p = 0.001 und p = 0.003 pro Jahr ablesen. Die entsprechenden Wiederkehrperioden betragen demnach etwa 300 bis 1000 Jahre.

Die Sicherheit gegen allfällige Schäden infolge von Erdbeben muss im Lichte der Auftretenswahrscheinlichkeit von Starkbeben sowie der Bedeutung und Lebensdauer der Anlage beurteilt wer-

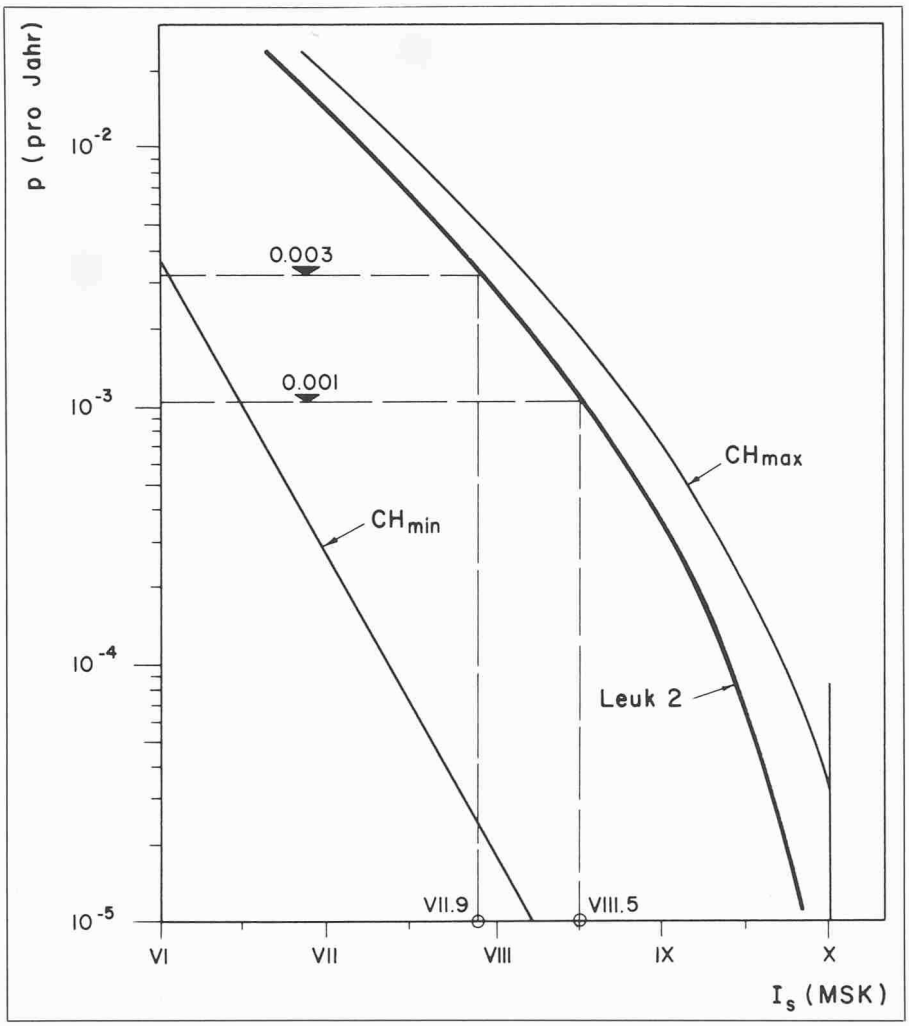


Bild 10. Risikobeziehung für den Standort der Antenne 2 in Leuk. Für die Standortintensität I_S können die zugehörigen Eintretenswahrscheinlichkeiten abgelesen werden. Zudem wird das Risiko in Leuk mit dem an extremen Standorten in der Schweiz verglichen (CH_{max}, CH_{min})

den. Eine quantitative Aussage dazu liefert die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit p, mit der das Bemessungsbeben innerhalb der Lebensdauer der Anlage von 20 Jahren mindestens einmal auftritt. Dazu kann die Lebenserwartungsformel verwendet werden, die für das 1000jährige Ereignis den Wert p = 2% und für das 300jährige Ereignis den Wert p = 6% ergibt. Aufgrund dieser kleinen Wahrscheinlichkeiten und der Feststellung, dass die Antenne ein Bauwerk darstellt, das bei einem allfälligen Einsturz keine Gefährdung für Bewohner oder Umgebung bedeutet, kann die mit 0.3 spezifizierte horizontale Erdbebenbeschleunigung als konservativ bezeichnet werden. Diese Aussage wird durch die Tatsache bestärkt, dass das Bauwerk im Erdbebenfall keine wichtige öffentliche Funktion, wie z. B. ein Spital, zu übernehmen hat.

Auslegung der Antenne gegen Erdbeben

Neben der maximalen Beschleunigung sind zur Auslegung der Antenne im allgemeinen weitere Angaben notwendig. Eine Möglichkeit besteht darin, aus einer detaillierten Analyse von Fern- und Nahbeben ein auf den Standort bezogenes Bemessungsspektrum zu bestimmen. Mit diesen zwei Grundlagen kann eine dynamische Analyse des Antennensystems durchgeführt werden.

Beim vorliegenden Projekt wurde jedoch lediglich eine *quasistatische Erdbebenanalyse* durchgeführt, ein Vorgehen, das als zweckmässig erachtet wurde, da die resultierenden Kippmomente und Beanspruchungen wesentlich kleiner ausfielen als die aus der Windbelastung.

Die Erkenntnis scheint sich mehr und mehr durchzusetzen, dass *Anlagen, die einen hohen Investitionswert darstellen, erbebensicher auszulegen sind*. Die Tendenz verstärkt sich zudem bei Anlagen, die in Zonen mit einem relativ hohen Erdbebenrisiko zu erstellen sind, und bei solchen, die im Katastrophenfall verfügbar sein müssen. Für die Bodenstation Leuk trifft zwar der letzte Aspekt nicht zu, hingegen waren die beiden ersten Kriterien Grund genug, Vorstellungen über das Risiko infolge Erdbeben zu gewinnen.

Windbelastung

Ausgangslage

Der Wind stellt für die Antenne den *bedeutendsten Lastfall* dar. Da die Antenne für einen *einwandfreien Sende- und Empfangsbetrieb* auszulegen war, aber auch *stärkste Sturmböen ohne Schäden zu überstehen* hat, wurden *zwei zulässige Windstärken* spezifiziert: eine *maximale Betriebswindgeschwindigkeit* und eine *Extremwindgeschwindigkeit*. Während unter der Betriebswindgeschwindigkeit die Deformationen der Antennenstruktur in engsten Grenzen gehalten werden mussten, und zwar für beliebige Windanstellwinkel, ging es unter der Extremwindgeschwindigkeit darum, die Antennenstruktur derart auszulegen, dass die Beanspruchungen die zulässigen Limiten nirgends überschritten. Dieser Lastfall musste jedoch nur an der Antenne mit vertikal nach oben gerichtetem Antennenspiegel («Überlebensposition») untersucht werden.

Anlässlich der Auslegung der ersten Antenne der Bodenstation Leuk wurden als Betriebswindgeschwindigkeit 33 m/s und als Extremwindgeschwindigkeit 53 m/s festgelegt. Es schien zweckmässig, dieselben Werte der zweiten Antenne zugrunde zu legen. Um diese Werte wissenschaftlich zu untermauern, wurde die Beratergruppe beauftragt, anhand von Windmessreihen die Werte auf eine solide, standortkonforme Grundlage zu stellen. Zur Verfügung stand eine Windmessreihe, welche die täglichen Böenspitzen am Standort der Bodenstation in der Periode vom 1. Jan. 1975 bis zum 31. Dez. 1978 enthielt. Diese Böenspitzen waren mit einem Anemographen auf dem Dach des bestehenden Betriebsgebäudes der Bodenstation registriert worden. Bei diesen Böenspitzen handelte es sich um über eine halbe Sekunde gemittelte Windgeschwindigkeiten.

Auswertung der Windmessungen

Zur Ermittlung extremer Windgeschwindigkeiten ist es in der Meteorologie üblich, die Summenhäufigkeit der gemessenen Windspitzen darzustellen. Meistens wird dabei die *Weibull-Darstellung* [4] verwendet, die von folgender, einer *Gumbel-Verteilung* entsprechenden, Summenhäufigkeit S ausgeht:

$$S(v > v_0) = e^{-\left(\frac{v_0}{c}\right)^k}$$

Darin bedeuten:

$S(v > v_0)$: Summenhäufigkeit des Auftretens von Windgeschwindigkeiten v grösser v_0

v, v_0: Windgeschwindigkeiten, hier tägliche Böenspitzen

k, c: Zu bestimmende Konstanten

Bei dieser Verteilung wird vorausgesetzt, dass die einzelnen Messungen stochastisch unabhängig sind, was im vorliegenden Fall nicht genau zutrifft. Allerdings fällt der Fehler hier nicht stark ins Gewicht.

In der Weibull-Darstellung wird diese Verteilung unter Beachtung der Beziehung

$$\log(-\log S) = k(\log v_0 - \log c) + \log\log e$$

in einem doppeltlogarithmischen / einfachlogarithmischen Diagramm mit den Achsen log (-log S) bzw. log v_0 als Gerade approximiert. In Bild 11 sind die Messresultate von Leuk dargestellt. Einbezogen wurden 486 tägliche Böenspitzen mit Geschwindigkeiten über 2,5 m/s, die innerhalb der Messperiode von 1126 Tagen auftraten. Die approximierende Gerade wurde derart gelegt, dass sie vor allem die hohen Messwerte berücksichtigt. Die Konstanten für diese Gerade betragen k = 3,11 und c = 16,1 s/m.
Es ist leicht einzusehen, dass mittels dieser Geraden die durchschnittliche Anzahl Tage d mit Böen-Spitzengeschwindigkeiten grösser als v_0 innerhalb a *Jahren über die Formel*

$$d(v > v_0) = 157{,}5 \cdot S(v_0) \cdot a$$

berechnet werden kann. Umgekehrt beträgt die Wiederkehrperiode a (in Jahren) für eine Böen-Spitzengeschwindigkeit $v > v_0$ an durchschnittlich d Tagen

$$a(v_0, d) = 6{,}35 \cdot 10^{-3}\, d/S$$

Zum Vergleich wird in Bild 11 die Verteilung der Böenspitzen für Föhn in Siders eingezeichnet. Im Unterschied zur Verteilung für Leuk handelt es sich hier jedoch um die Maxima der einzelnen Föhnstürme, die unter Umständen über mehrere Tage dauerten. Diese Werte können deshalb eher als statistisch unabhängig bezeichnet werden als die für Leuk. Obwohl sich Lage und Topographie unterscheiden, ist die Übereinstimmung erstaunlich gut.

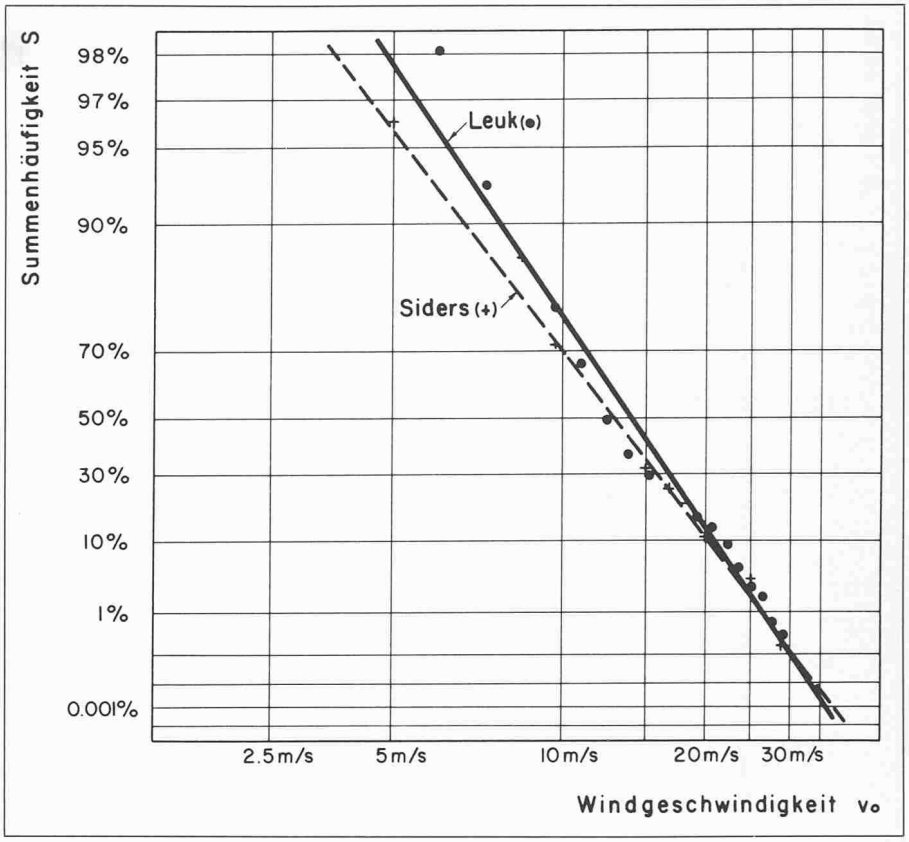


Bild 11. Weibull-Darstellung der Böenspitzen in Leuk (Betriebsgebäude) und Siders

Extrapolation der Windstatistik

Im vorliegenden Falle wurde eine Extrapolation auf 35 m/s als zulässig erachtet (siehe Bild 11). Die Wiederkehrperiode für den Betriebswind von 33 m/s beträgt dann rund 70 Jahre.
Die Wiederkehrperiode für den Extremwind lässt sich mit der vorhandenen Datenbasis nur schwer schätzen, insbesondere, da man sich im meteorologisch denkbaren oberen Grenzbereich befindet.
Die Wiederkehrperiode einer Böenspitze von 30 Jahren bedeutet selbstverständlich nicht, dass dieses Ereignis tatsächlich innerhalb von 30 Jahren wirklich eintreten wird. Zudem ist es natürlich nicht ausgeschlossen, dass das Ereignis mehrere Male eintritt. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis in n Jahren x-mal eintritt, unter der Voraussetzung, dass es in N Jahren durchschnittlich einmal zu erwarten ist, wird durch die *Binomialverteilung*

$$P_n(x) = \frac{n!}{x!\,(n-x)!} \cdot \left(\frac{1}{N}\right)^x \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{n-x}, N > n$$

gegeben.
Für das zu erwartende Auftreten der spezifizierten Böenspitzen von 33 m/s mit einer durchschnittlichen Wiederkehrperiode von 70 Jahren ergeben sich daraus die in Tabelle 5 zusammengestellten Wahrscheinlichkeiten.

Tabelle 5. Auftretenswahrscheinlichkeit der 33 m/s - Böenspitze innerhalb 70 bzw. 20 Jahren

Anzahl Eintritte x	*Eintretenswahrscheinlichkeit* $P_n(x)$	
	n = 70 Jahre	*n = 20 Jahre*
kein einziges Mal (x = 0)	0.37	0.75
mindestens einmal (x ≧ 1)	0.63	0.25
genau einmal (x = 1)	0.37	0.22
genau zweimal (x = 2)	0.19	0.03

Daraus ist ersichtlich, dass selbst eine Böenspitze von lediglich 33 m/s während der Lebensdauer der Antenne von 20 Jahren kaum auftreten wird.
Sehr wahrscheinlich wird ein Betriebsunterbruch infolge zu starken Windes höchstens einmal notwendig sein. Somit stellt der *Wind für den Betrieb keinen ins Gewicht fallenden Faktor* dar. Die entsprechende, spezifizierte Windgeschwindigkeit wurde genügend konservativ angesetzt.
Dasselbe gilt für die statische Auslegung der Antennenkonstruktion auf Windkräfte. Zumal die maximal zu erwartende Windgeschwindigkeit von ungefähr 40 m/s wesentlich kleiner ist als die spezifizierte (53 m/s), wurde auch diese Limite ausreichend konservativ festgelegt.
Schliesslich sei der Vergleich mit der Norm SIA 160 angestellt. Hier wird die maximale, für die statische Bemessung massgebende Windgeschwindigkeit mit 44,7 m/s angegeben, und zwar für eine Höhe über Terrain von 15–40 m. Die spezifizierte Extremwindgeschwindigkeit liegt also wesentlich über dem SIA-Wert.

Qualitätssicherung

Allgemeines zur Qualitätssicherung

Die hohen Genauigkeitsanforderungen und die Komplexität des Antennensystems erforderten besondere Massnahmen, um die geforderte Qualität des Endproduktes sicherzustellen. Der Bauherr wandte deshalb den Anforderungen entsprechende Qualitätssicherungsmethoden an. Diese Methoden wurden ursprünglich für den betrieblich-finanziellen Bereich (Bücherrevisionen) geschaffen und später für die Qualitätssicherung auf dem Nuklearsektor weiterentwickelt. Im wesentlichen ist es ein *Managementproblem*, wie es sich vor allem bei komplexen Systemen mit zahlreichen Subsystemen und Abhängigkeiten stellt.
Unter Qualtätssicherung (QS) sind alle Tätigkeiten zu verstehen, die ergriffen

werden, um die geforderte Güte eines Systems sicherzustellen. Im vorliegenden Fall wurden im wesentlichen folgende *vier Teilbereiche* angesprochen: *Planung und Organisation der Qualitätssicherung, Qualitätskontrollen, Inspektionen* (englisch: audits) sowie *Dokumentation* (vgl. Bild 12). Diese Massnahmen betreffen die gesamte Projekthierarchie und sind auf Stufe Bauherr, Generalunternehmer, Hersteller und Unterakkordanten sowie allfälliger, unabhängiger Kontrollorgane anzuordnen.

Die Planung und Organisation der Qualitätsicherung ist schriftlich festzuhalten. Sie umschreibt die Verantwortlichkeiten, die einzelnen Kontrollbereiche, die durchzuführenden Kontrollen (Art, Zeitpunkt, Häufigkeit), die zu treffenden Massnahmen bei ungenügenden Leistungen, die Dokumentation, usw. Die eigentlichen Kontrollen sind Bestandteil der QS und werden auf allen Stufen, gemäss den Festlegungen im QS-Programm, durchgeführt und ausgewertet. Die Inspektionen (audits) sind periodisch durch die zuständigen Organe der übergeordneten Stufe bei den Unterstellten vorzunehmen, um sicherzustellen, dass die angeordneten QS-Massnahmen auch wirklich im Sinne der übergeordneten Stufe vollzogen werden. Die Inspektionen bestehen hauptsächlich aus Befragungen von Verantwortlichen und punktuellen Kontrollen auf den unteren Stufen, gestützt auf vorbereitete Checklisten. Grundsätzlich ist zwischen *drei Arten von Überprüfungen* zu unterscheiden, nämlich der *System-, Prozess- und Produktüberprüfung*. Die Systemüberprüfung beim Hersteller beispielsweise gibt Auskunft über alle Belange des Produktionsprozesses, beginnend bei der Organisation über Einkaufsmethoden, QS-Organisation, Verarbeitung und Lagerung der Werkstücke, Transport, usw. bis zum Rechnungsabschluss. Die Prozessüberprüfung konzentriert sich auf einen einzelnen Herstellungsprozess, während in der Produktüberprüfung die Qualität von Werkstücken, z.T. stichprobenartig, beurteilt wird.

Die Frage, weshalb für den Bau des Antennensystems Leuk die eben beschriebene Methodik angewandt wurde, lässt sich klar beantworten. Der Bauherr fordert ein System, das während der spezifizierten *Lebensdauer von zwanzig Jahren praktisch ohne Unterbruch funktionstüchtig bleibt und minimalen Unterhalt erfordert*. Die Bedeutung der ersten Forderung lässt sich leicht ermessen, verursacht doch ein Verbindungsunterbruch von einer Minute einen Einnahmenausfall von einigen hundert Franken. Im internationalen Zuverlässigkeitswettbewerb der Satelliten-Bodenstationen würde ein derartiger Betriebsunterbruch einen Spitzenplatz in der Rangliste ausschliessen.

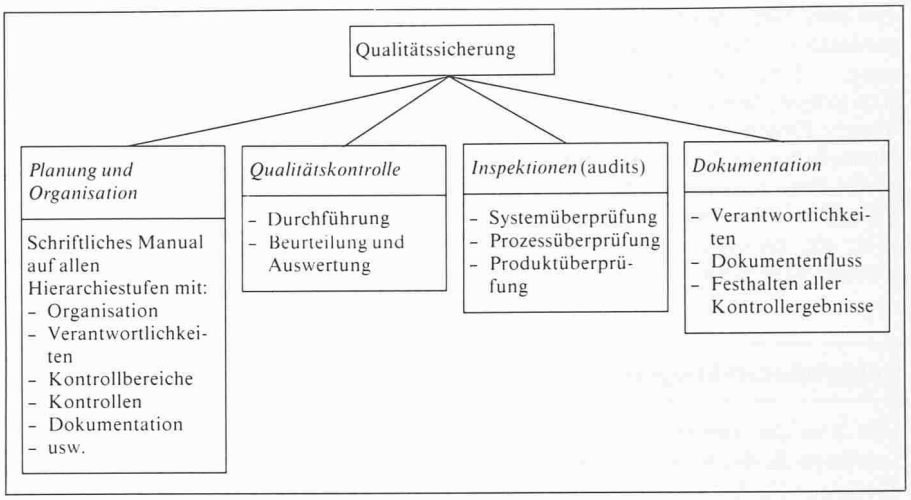


Bild 12. Übersicht über die Qualitätssicherung

Tabelle 6. Qualitätssicherungsmassnahmen der einzelnen Hierarchiestufen am Beispiel der Stahlkonstruktion

Hierarchiestufe	*QS-Massnahmen bei*			
	Bauherr	*Generalunternehmer*	*Stahlbauunternehmer*	*Unterakkordant*
Bauherr	QS-Planung Dokumentation	Systemüberprüfung inkl. Überprüfung der Projektierung	Systemüberprüfung Prozessüberprüfung Produkteüberprüfungen	Prozessüberprüfung Produkteüberprüfungen
Generalunternehmer		QS-Planung Dokumentation	Systemüberprüfung Prozessüberprüfung Produkteüberprüfungen	Prozessüberprüfung Produkteüberprüfungen
Stahlbauunternehmer			Qualitätskontrollen Dokumentation	Produkteüberprüfungen
Unterakkordanten				Qualitätskontrollen Dokumentation

Bauherr und Berater hatten deshalb allen Grund, die Qualität eines derart komplexen Systems mittels der beschriebenen Methodik zu gewährleisten. Die Erfahrung hat eindeutig bewiesen, dass dank dieser transparenten und einfachen Methodik Schwachstellen frühzeitig erkannt wurden, so dass die notwendigen Korrekturen fristgerecht einsetzen konnten. Zudem liess sich durch zielgerichtete Besprechungen und Kontrollen viel Leerlauf vermeiden.

QS-Massnahmen sind schon seit den Anfängen der Baukunst bekannt. Wesentlich ist hier, dass die vorliegende Methodik eine umfassende, zielstrebige und optimale Qualitätssicherung gewährleistet.

Angewandtes Qualitätssicherungskonzept

Während des Baues der zweiten Antenne in Leuk erfolgte die Qualitätssicherung nach der beschriebenen Methodik vor allem auf Stufe Bauherr und Generalunternehmer. Die einzelnen QS-Massnahmen der verschiedenen Hierarchien sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Entscheidend für die Wirksamkeit all dieser Massnahmen waren ihre detaillierte Planung und zielgerichtete Durchführung, wobei vor allem auf Stufe Bauherr mit ausführlichen Checklisten gearbeitet wurde. Die Systemüberprüfung des Generalunternehmers durch den Bauherrn erstreckte sich über die technischen und organisatorischen Möglichkeiten und Strukturen, wobei vor allem die Detailprojektierung genau kontrolliert wurde. Während der Herstellungs- und Montagephase unterlagen vor allem die QS-Massnahmen des Generalunternehmers systematischen Überprüfungen. Zu Beginn der Herstellung der Antennenstruktur im Werk wurde der Stahlbauunternehmer einer *Systemüberprüfung* unterzogen (Tabelle 7), die alle wesentlichen Berei-

che umfasste (Administration, QS-Organisation, Materialeinkauf und -lagerung, Eingangskontrolle, laufende Kontrollen, Stichproben, Mängelbehebung). Zudem erfolgten während der Herstellung und der Montage periodisch *Prozess- und Produktüberprüfungen*. Alle diese Tätigkeiten hatten zum Ziel, ein *spezifikationskonformes Endprodukt* zu sichern.

Schlussbemerkungen

Der Bau der zweiten Antenne für die Satelliten-Bodenstation Lenk stellte aussergewöhnliche Anforderungen an alle Beteiligten, ganz besonders aber an den Stahlbauunternehmer. Die angewandten Qualitätssicherungsmassnahmen vermochten zwar einzelne Fehlleistungen nicht zu verhindern, wohl aber nachträglich zu korrigieren. Wie wirksam und umfassend die getroffenen, qualitätssichernden Massnahmen letztlich waren, lässt sich zurzeit kaum zuverlässig abschätzen. Spätestens nach einigen Betriebsjahren werden aber die vom Betreiber gesammelten Erfahrungen erlauben, diese Frage klar und eindeutig zu beantworten. Einmal mehr hat sich gezeigt, wie entscheidend das Verhalten des Bauherrn den Projektablauf und die Qualität des Endproduktes beeinflussen kann. Dank einer sorgfältigen und intensiven Vorbereitung und Begleitung aller Projektphasen und dem Grundsatz, sich nicht mit einem mittelmässigen Produkt «ab Stange» begnügen zu wollen, hat der Bauherr wegbestimmende Marken gesetzt. Der intensive Gedanken- und Erfahrungsaustausch zwischen Bauherr und Berater sowie die bei Besuchen ausländischer Satelliten-Bodenstationen gewonnenen Erkenntnisse vermittelten wesentliche Impulse für die anlässlich der Vertragsverhandlungen diskutierten Verbesserungsvorschläge.

Tabelle 7. Auszug aus der Checkliste für die Systemüberprüfung des Stahlbauunternehmers

	1)	2)	3)
1. *Administration*			
Ist ein QS-Handbuch vorhanden?	○	○	○
Benützt das Werk ein einheitliches QS-System?	○	○	○
Werden die QS-Massnahmen periodisch überprüft und verbessert?	○	○	○
2. *Eingangskontrolle*			
Wird das eingehende Material anhand der Bestellung oder des Materialzertifikates identifiziert?	○	○	○
Enthalten die Eingangsprotokolle Angaben über Annahme oder Rückweisung der Sendung?	○	○	○
Sind die Eingangsprotokolle zweckmässig abgelegt?	○	○	○
3. *Laufende Kontrollen*			
Sind die geplanten Prozessüberprüfungen auf den Herstellungsprozess abgestimmt?	○	○	○
Gewährleisten personelle Besetzung und Lage der Kontrollstellen eine effiziente Kontrolle?	○	○	○
Wird nicht spezifikationskonformes Material sofort bezeichnet und ausgeschieden?	○	○	○
4. *Mängelbehebung*			
Besitzt das Werk ein angepasstes Mängelbehebungskonzept?	○	○	○
Werden mangelhafte Werkstücke analysiert, um Grund und Ausmass der Fehlleistung zu eruieren?	○	○	○
Bewirkt eine Tendenz zu ungenügenden Leistungen korrektive Massnahmen?	○	○	○

1) Anforderungen werden erfüllt
2) Anforderungen nur teilweise erfüllt
3) Massnahme wird nicht angewandt

Verdankung

Für die generelle Unterstützung und die Durchsicht der fernmeldetechnischen Aspekte dieses Artikels sei den Herren *P. Breu* und *K. Scherrer* von der Generaldirektion PTT, Bern, herzlich gedankt. Die Koordination innerhalb des Projektteams Basler & Hofmann wurde durch Herrn Dr. *E. C. Glauser* wahrgenommen.

Bauherr:
Generaldirektion PTT
Beraterteam:
- Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich (Federführung, bauliche und maschinentechnische Aspekte)
- Hochstrasser Consulting AG, Zürich (Klimatechnik)

Literaturhinweise

[1] *Sägesser, R. und Mayer-Rosa, D.*: «Erdbebengefährdung in der Schweiz». Schweizerische Bauzeitung, Heft 7, 1978
[2] *Newmark, N.M.*: «Consulting Engineering Services; A Study of vertical and horizontal Earthquake Spectra». USAEC Contract No. AT (49.5) - 2667, WASH 1255, 1973
[3] *O'Brien, L.J., Murphy, J.R., Lahoud, J.A.*: «The Correlation of Peak Ground Acceleration Amplitude with Seismic Intensity and other Physical Parameters». Computer Science Corp., Falls Church, Ca., USA, 1976
[4] *Valko P.*: «Meteoplan, Meteorologische Planungsgrundlagen». Heft 2, Hallwag Verlag Bern, Mai 1978

Adresse der Verfasser: Dr. *U. W. Stüssi*, dipl. Ing. ETH und *R. Widmer*, dipl. Ing. ETH, c/o Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Forchstr. 395, 8029 Zürich