

KfK 4825

Mai 1991

**Untersuchungen an  
mikrostrukturierten  
Bandpaßfiltern für das  
Ferne Infrarot und ihre  
Herstellung durch  
Röntgentiefenlithographie und  
Mikrogalvanoformung**

R. Ruprecht, W. Bacher  
Institut für Mikrostrukturtechnik

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Mikrostrukturtechnik

KfK 4825

**Untersuchungen an mikrostrukturierten  
Bandpaßfiltern für das Ferne Infrarot und ihre  
Herstellung durch Röntgentiefenlithographie und  
Mikrogalvanoformung**

R. Ruprecht \*), W. Bacher

\*) von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe  
genehmigte Dissertation

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

# Untersuchungen an mikrostrukturierten Bandpaßfiltern für das Ferne Infrarot und ihre Herstellung durch Röntgentiefenlithographie und Mikrogalvanoformung

## Zusammenfassung

Mit dem im Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelten LIGA-Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen wurden erstmalig Bandpaßfilter für das Ferne Infrarot hergestellt, deren Durchlaßbereich ("Paßband") im Wellenlängenbereich von 10  $\mu\text{m}$  bis 50  $\mu\text{m}$  liegt.

Die Bandpaßfilter sind als "Resonante Gitter" gefertigt und bestehen aus 2 bis 29  $\mu\text{m}$  dicken Kupfermembranen, die mit Kreuzschlitz- und Tripolschlitzaperturen perforiert sind. Es wurden Filter mit Gitterkonstanten zwischen 14,5 und 24,5  $\mu\text{m}$  mit Schlitzlängen zwischen 11,5 und 20  $\mu\text{m}$  und Schlitzbreiten zwischen 3 und 5  $\mu\text{m}$  hergestellt. Bandpaßfilter mit solch kleinen Abmessungen konnten mit bisherigen Herstellungsmethoden nicht realisiert werden. Mit dem LIGA-Verfahren können außerdem die Schlitzaperturwände der Bandpaßfilter sehr eben, glatt und parallel erzeugt werden. Die Qualität der scharfen Kanten zwischen Schlitzwänden und Filteroberfläche ist verantwortlich für die gemessene hohe Infrarot-Transmission zwischen 55 und 100%.

Die Transmissionsmaxima, die an Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen gemessen wurden, liegen auf der Frequenzskala unterhalb der Beugungskante, die durch die Gitterkonstante der Bandpaßfilter bestimmt wird. Die Lage des ersten, niederfrequenten Transmissionsmaximums wird nur durch die laterale Schlitzgeometrie bestimmt. Transmissionsmessungen an Bandpaßfiltern mit Tripolschlitzaperturen, die in dieser Arbeit erstmals vorgestellt werden, führen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Mit dem LIGA-Verfahren ist es möglich, die beschriebenen Filter in verschiedener Dicke bei gleicher lateraler Geometrie herzustellen. In der vorliegenden Arbeit wurde die relative Filterdicke (Filterdicke bezogen auf die Gitterkonstante) von 0,1 bis 1,5 variiert. Bei dieser Filterdickenvariation wurde festgestellt, daß bei allen Bandpaßfiltern die Trennschärfe zum niederfrequenten Spektralbereich und das Sperrverhalten mit zunehmender Filterdicke entscheidend verbessert wird. Gleichzeitig treten im Paßband neben dem ersten, niederfrequenten Transmissionsmaximum mit zunehmender Filterdicke weitere Maxima auf. Diese Maxima nähern sich mit zunehmender Filterdicke dem ersten Transmissionsmaximum.

Neben den Bandpaßfiltern aus Kupfer wurden auch Filter gleicher Geometrie aus Gold und Nickel hergestellt. Ein Einfluß des Materials auf die Transmissionskurven konnte nicht festgestellt werden.

Je nach Filterdicke wurden die Bandpaßfilter nach einer von zwei neu entwickelten Varianten des LIGA-Prozesses hergestellt. Dünne Filter wurden auf mehrschichtigen Substraten als freitragende Mikrostruktur gefertigt und auf einen Stütz- bzw. Blendenring aus Kupfer geklebt; dickere Filter wurden im Stoffverbund mit dem Blendenring durch Anwendung des LIGA-Prozesses auf der Stirnseite einer Titanrunde mit Kupfermantel und durch nachfolgendes selektives Ätzen des Titans hergestellt.

Mit Hilfe der beschriebenen Filterdickenvariation wurden verschiedene Bandpaßfilter für die Aufgaben des Photometers ISOPHOT des Weltraumobservatoriums ISO optimiert und in Kleinserie hergestellt. ISOPHOT ist eines von vier Experimenten von ISO, die 1993 mit einer Ariane-Rakete der Europäischen Welt Raumbehörde ESA starten werden, um eine Himmelskartierung und Sternbeobachtungen im Wellenlängenbereich von 3 bis 200  $\mu\text{m}$  vorzunehmen. Mit thermischen und mechanischen Beanspruchungszyklen wurden die Filter für ISOPHOT erfolgreich auf Weltraumtauglichkeit getestet und vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, zum Einbau in das Satellitenexperiment freigegeben.

# Investigations of Microstructurized Bandpassfilters for the Far Infrared and Their Fabrication by Means of Deep-Etch X-Ray Lithography and Micro-Electroforming

## Abstract

The LIGA technique, which has been developed at the Karlsruhe Nuclear Research Center for the fabrication of microstructures, has now been applied for the first time for the production of bandpass filters for the Far Infrared. The passband of these filters is located in the wavelength range of 10  $\mu\text{m}$  - 50  $\mu\text{m}$ .

The bandpass filters are designed as "resonant grids". They consist of copper membranes with a thickness of 2 - 29  $\mu\text{m}$  which are perforated by crossed-shaped and tripole-shaped slit apertures, respectively. Filters with grid constants ranging from 14.5 to 24.5  $\mu\text{m}$  have been produced. The slit length varies between 11.5 and 20  $\mu\text{m}$ , while the slit width amounts to 3 - 5  $\mu\text{m}$ . Previous fabrication techniques did not allow the production of bandpass filters with such small dimensions. In addition, the LIGA technique is applied for the generation of extremely plane, smooth and parallel slit-aperture walls of the bandpass filters. The quality of the sharp edges between the slit walls and the filter surface is responsible for the high infrared peak transmissions of 55 - 100 % measured.

In the bandpass filters with crossed-shaped apertures the peak transmissions measured are found to be below the diffraction edge on the frequency scale which is determined by the grid constant of the bandpass filters. The location of the first low-frequency transmission peak is affected by the lateral slit geometry only. Comparable results are obtained by the transmission measurements of bandpass filters with tripole-shaped apertures which are presented for the first time in this work.

Using the LIGA technique, filters of this type can be produced with a variable thickness while the lateral geometry remains constant. In this case, the relative filter thickness (filter thickness in relation to the grid constant) is varied between 0.1 and 1.5. As a result, selectivity with respect to the low-frequency range of the spectrum as well as the stopband characteristics are found to be improved considerably with increasing filter thickness of all bandpass filters. At the same time, peaks other than the first low-frequency transmission peak become visible in the passband while the filter thickness is increased. These peaks approach the first transmission peak as the filter thickness increases.

Besides the bandpass filters made of copper, gold and nickel filters are fabricated. Their geometry, however, remains the same. The transmission curves are not found to be influenced by the material used.

Depending on the filter thickness, the bandpass filters are produced in accordance with one of both variants of the LIGA technique which have been developed recently. Thin filters are fabricated on multilayered substrates as a self-supported microstructure with successive bonding onto a diaphragm ring made of copper. Thick filters are produced on the face of a copper-sheathed titanium blank by using the LIGA technique. Parallel to electroforming of a filter on the titanium core a joint-free connection between the filter and the copper ring is generated. After selective etching of titanium the filter membranes are self-supported microstructures.

By varying the filter thickness as described above, several bandpass filters have been optimized for use in the ISOPHOT photometer of the Infrared Space Observatory (ISO) and manufactured in a small lot. ISOPHOT represents one of four ISO experiments. In 1993 the observatory will be launched with the Ariane rocket built by the European Space Agency ESA. Its tasks shall include the mapping of the sky as well as the performance of astronomic observations in the wavelength interval of 3 - 200  $\mu\text{m}$ . Under thermal and mechanical load cycles the filters to be used in ISOPHOT have been tested successfully with regard to their qualification for space. Permission for the installation in the satellite experiment was given by the Max Planck Institute for Radioastronomy at Bonn.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung und Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Darstellung der bekannten experimentellen und theoretischen Untersuchungen an Filtern für das Ferne Infrarot .....</b>	<b>12</b>
2.1	Historische Entwicklung .....	12
2.2	Experimentelle Untersuchungen an Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen	14
2.2.1	Ergebnisse aus den Experimenten von Cunningham .....	14
2.2.2	Ergebnisse aus den Experimenten von Chase und Joseph .....	16
2.2.3	Ergebnisse aus den Experimenten von Gemünd .....	17
2.3	Berechnung der Transmission von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen	19
2.3.1	Elektromagnetisches Ersatzschaltbild .....	19
2.3.2	Theoretische Simulation von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen	22
	Einfluß der lateralen Geometrie .....	23
	Einfluß der Dicke der Filterstrukturen .....	25
	Übersicht.....	25
2.4	Bandsperrfilter mit Tripolstrukturen .....	27
<b>3.</b>	<b>Herstellungsverfahren und Experimentelles .....</b>	<b>30</b>
3.1	Herstellung von Infrarotbandpaßfiltern nach dem LIGA-Verfahren .....	30
3.2	Fertigungsvarianten bei der Filterherstellung .....	33
3.2.1	Herstellungsmethode für Filter mit Dicken oberhalb 5 µm .....	33
3.2.2	Herstellungsmethode auch für weniger als 5 µm dicke Filter .....	36
3.3	Materialauswahl für die Galvanoformung von LIGA-Filtern.....	38
3.4	Unterplattierung an LIGA-Filtern .....	38
3.4.1	Vermeidung der Unterplattierung durch selektiv ätzbare Zwischenschichten	39
3.4.2	Beseitigung der Unterplattierung durch Sputterätzen.....	41
3.5	Fertigungskontrolle.....	42

<b>4.</b>	<b>Darstellung der Ergebnisse .....</b>	<b>43</b>
4.1	Meßergebnisse an Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen .....	43
4.1.1	Einfluß der Dicke von Filtern aus Kupfer auf ihre Transmissions- charakteristik .....	43
4.1.2	Einfluß des Materials der Filter auf ihre Transmissionscharakteristik ....	47
4.1.3	Einfluß der Unterplattierung an Filtern auf ihre Transmissions- charakteristik.....	48
4.1.4	Einfluß der Filterdicke auf die Trennschärfe von Bandpaßfiltern .....	49
4.2	Meßergebnisse an Filtern mit Tripolschlitzaperturen.....	51
4.2.1	Einfluß der Filterdicke auf die Transmissionscharakteristik von Filtern mit Tripolschlitzaperturen 'KT' .....	51
4.2.2	Einfluß der Filterdicke auf die Transmissionscharakteristik von Filtern mit Tripolschlitzaperturen 'GT' .....	56
4.2.3	Einfluß polarisierter Strahlung auf die Transmissionscharakteristik von Filtern mit Tripolschlitzaperturen .....	61
<b>5.</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>63</b>
5.1	Vergleich zwischen experimentellen und theoretischen Ergebnissen .....	63
5.1.1	Einfluß der lateralen Geometrie auf die Lage des ersten Trans- missionsmaximums .....	63
5.1.2	Einfluß des Materials auf die Transmissionscharakteristik .....	65
5.1.3	Einfluß der Unterplattierung auf die Transmissionscharakteristik .....	66
5.1.4	Einfluß der polarisierten Strahlung auf die Transmissions- charakteristik .....	66
5.1.5	Einfluß der Filterdicke auf die Transmissionscharakteristik .....	67
5.2	Vergleich der beiden Fertigungsverfahren zur Herstellung von LIGA- Filtern	70
5.3	Auswahl der Bandpaßfilter für ISOPHOT .....	71
<b>6.</b>	<b>Anhang: Das Weltraumexperiment ISOPHOT .....</b>	<b>76</b>
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>79</b>

## 1. Einleitung und Zusammenfassung

Die Europäische Weltraumorganisation ESA plant, im Jahr 1993 das Weltraumobservatorium ISO (Infrared Space Observatory) zu starten, das stellare und interstellare Beobachtungen im Fernen Infrarot (FIR) <sup>1</sup> durchführen soll /3 - 5/. Eine der vier Experimentenkammern von ISO soll mit dem Photometer ISOPHOT ausgerüstet werden. Eine Beschreibung des Experiments wird im Anhang gegeben (Kap. 6).

Für astronomische Beobachtungen im FIR werden Halbleiter-Detektoren eingesetzt, die breitbandig sind /6/. Um bei den Messungen eine möglichst hohe spektrale Auflösung und damit genauere Aussagen über die observierten Objekte zu erhalten, sollen die großen Empfindlichkeitsbereiche der Detektoren durch schmalbandige Bandpaßfilter<sup>2</sup> unterteilt werden.

Um die Meßbereiche optimal aufzuteilen, müßten die Bandpaßfilter ein rechteckförmiges Transmissionsprofil besitzen. Bedingt durch das Rechteckprofil würde sich ein scharf begrenztes Paßband ergeben. Aus der unendlich hohen Steigung der Flanke zwischen dem unterdrückten Spektralbereich und dem Paßband errechnet sich eine ideale Trennschärfe<sup>3</sup> der Bandpaßfilter. Ideale Bandpaßfilter weisen neben einer idealen Trennschärfe völlige Durchlässigkeit im Paßband und totale Absorption in den benachbarten Spektralbereichen auf. Dadurch ergibt sich ein Transmissionsunterschied von 100 %, d. h. ein idealer Kontrast<sup>4</sup> für die Bandpaßfilter.

In der Praxis ist die Trennschärfe von Bandpaßfiltern unterschiedlich gut, da die Steigung der Flanke zum Paßband von den Geometriemaßen der Filter abhängt.

---

<sup>1</sup> Spektralbereich FIR: Wellenlänge  $\lambda \approx 10 - 1000 \mu\text{m}$   
 Frequenz  $f \approx 30 - 0,3 \text{ THz}$  ( $\nu \approx 1000 - 10 \text{ cm}^{-1}$ )  
 Photonenenergie  $E \approx 0,00124 - 0,124 \text{ eV}$

<sup>2</sup> Bandpaßfilter sind in einem definierten Spektralbereich, der Paßband genannt wird, transparent. Die dem Paßband benachbarten hoch- und niederfrequenten Spektralbereiche werden vom Bandpaßfilter unterdrückt.

<sup>3</sup> In der Arbeit wird als Trennschärfe definiert:  $\Delta T / \Delta \nu : T_{\text{max}} [\% / \text{cm}^{-1}]$ .  $\Delta T / \Delta \nu$  ist die Steigung der niederfrequenten Flanke zum Paßband. Zur Berechnung der Trennschärfe wird die Steigung auf die maximale Transmission im Paßband normiert. Ein hoher Wert der Trennschärfe charakterisiert ein gutes Bandpaßfilter, bei dem der Übergang vom unterdrückten Spektralbereich zum Paßband in einem schmalen Frequenzbereich erfolgt.

<sup>4</sup> Als Kontrast wird in dieser Arbeit die Differenz zwischen der maximalen Transmission im Paßband und der minimalen Transmission in den unterdrückten Spektralbereichen, d. h. der "Hell - Dunkel - Unterschied" im FIR bezeichnet.

Durch geeignete Wahl der Geometriemaße sollen Bandpaßfilter mit einer hohen Trennschärfe zum niederfrequenten Spektralbereich erzeugt werden. Die hochfrequente Grenze der Meßbereiche werden durch zusätzlich zu den Bandpaßfiltern verwendete, entsprechend angepaßte Tiefpaßfilter<sup>5</sup> definiert. Die Tiefpaßfilter sollen ein zuverlässiges Sperren im hochfrequenten Spektralbereich bewirken und die Detektoren vor energiereicher Strahlung schützen. Während die Tiefpaßfilter das Sperren im hochfrequenten Spektralbereich übernehmen, müssen im niederfrequenten Bereich die Bandpaßfilter ein gutes Sperrverhalten<sup>6</sup> besitzen. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn die niederfrequente Grenze des gewünschten Meßbereichs nicht mit der Empfindlichkeitsgrenze des Detektors zusammenfällt. Als Beispiel einer solchen Paarung ist in Abb. 1 die Transmissionskurve eines Bandpaß- und eines Tiefpaßfilters zusammen mit der Empfindlichkeitskurve eines Detektors dargestellt.

Die Bandpaßfilter, die bei ISOPHOT eingesetzt werden sollen, werden als sogenannte resonante Gitter /7/ bezeichnet (siehe Kap. 2). Sie bestehen aus einer selbsttragenden Metallmembran mit Schlitzaperturen, die periodisch angeordnet sind. Diese Schlitzaperturen können z. B. die Form von Kreuzen (gekreuzten Dipolen) oder Tripolen besitzen. In Abb. 2 sind beide Filterstrukturen mit ihren charakteristischen Maßen skizziert. Die in Abb. 2 eingeführten charakteristischen Abmessungen der Schlitzaperturen von resonanten Gittern werden im folgenden durchgehend verwendet.

---

<sup>5</sup> Durch ein Tiefpaßfilter tritt niederfrequente Strahlung hindurch, für hochfrequente Strahlung wirkt das Filter als Sperre. Die Grenzfrequenz gibt die Position der Grenze zwischen beiden Bereichen an.

<sup>6</sup> Ein gutes Sperrverhalten besitzen Bandpaßfilter, die die Spektralbereiche außerhalb des Paßbands stark unterdrücken.

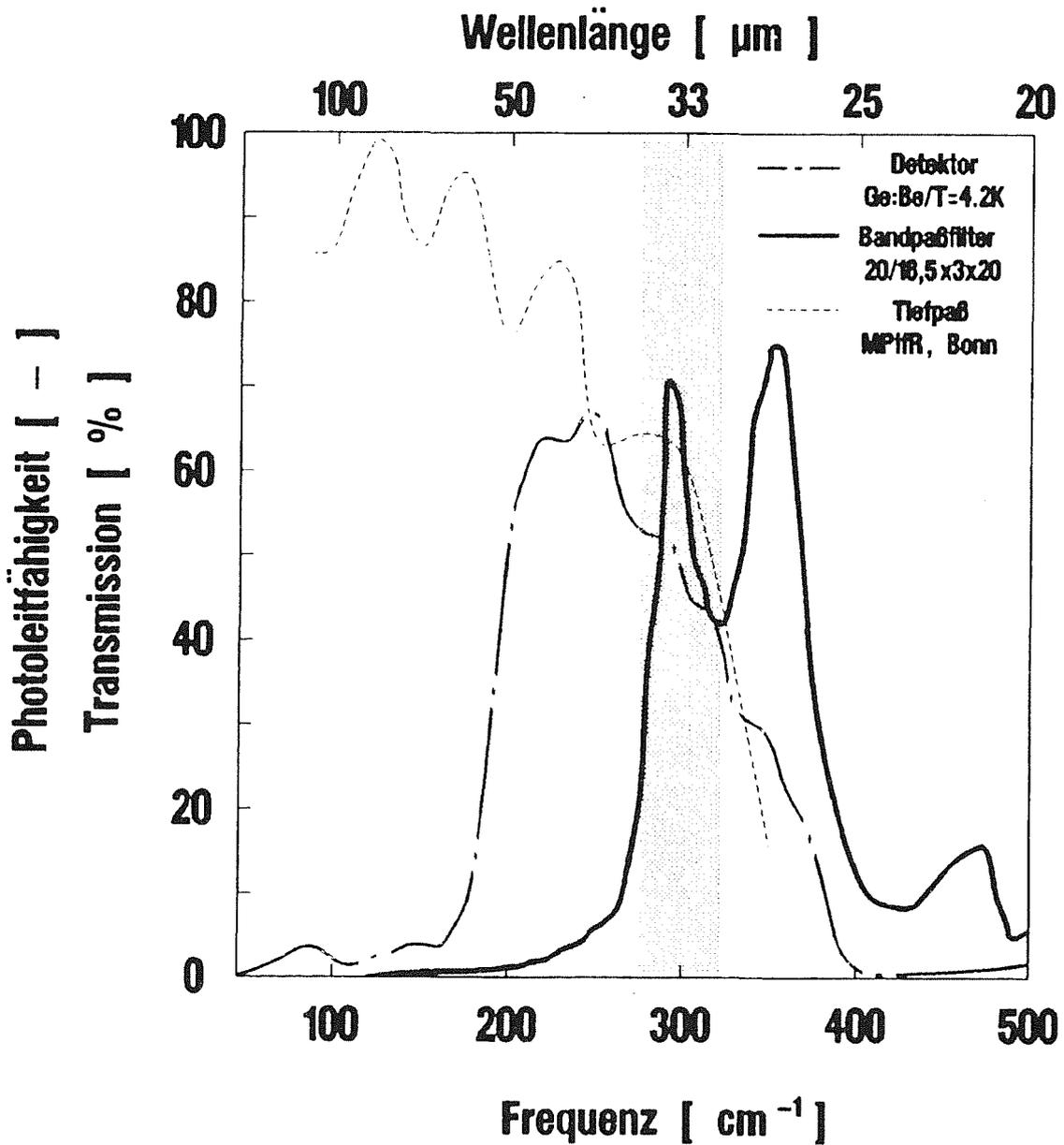


Abb. 1: Darstellung der Transmissionskurve eines nach dem LIGA-Verfahren gefertigten Bandpaß- ((g/k\*j\*t): s. Abb. 2) und eines Tiefpaßfilters zusammen mit der Empfindlichkeitskurve eines ISOPHOT-Detektors bei 4,2 K als Funktion der Frequenz bzw. Wellenlänge. Der gewünschte Meßbereich ist grau unterlegt. Da der Detektor für Frequenzen, die kleiner sind als die des Meßbereichs, eine hohe Empfindlichkeit besitzt, muß der Bandpaßfilter im niederfrequenten Spektralbereich ein gutes Sperrverhalten und eine hohe Trennschärfe besitzen. Die hochfrequente Grenze des Gesamtsystems wird durch das Tiefpaßfilter und den Abfall der Empfindlichkeit des Detektors bestimmt.

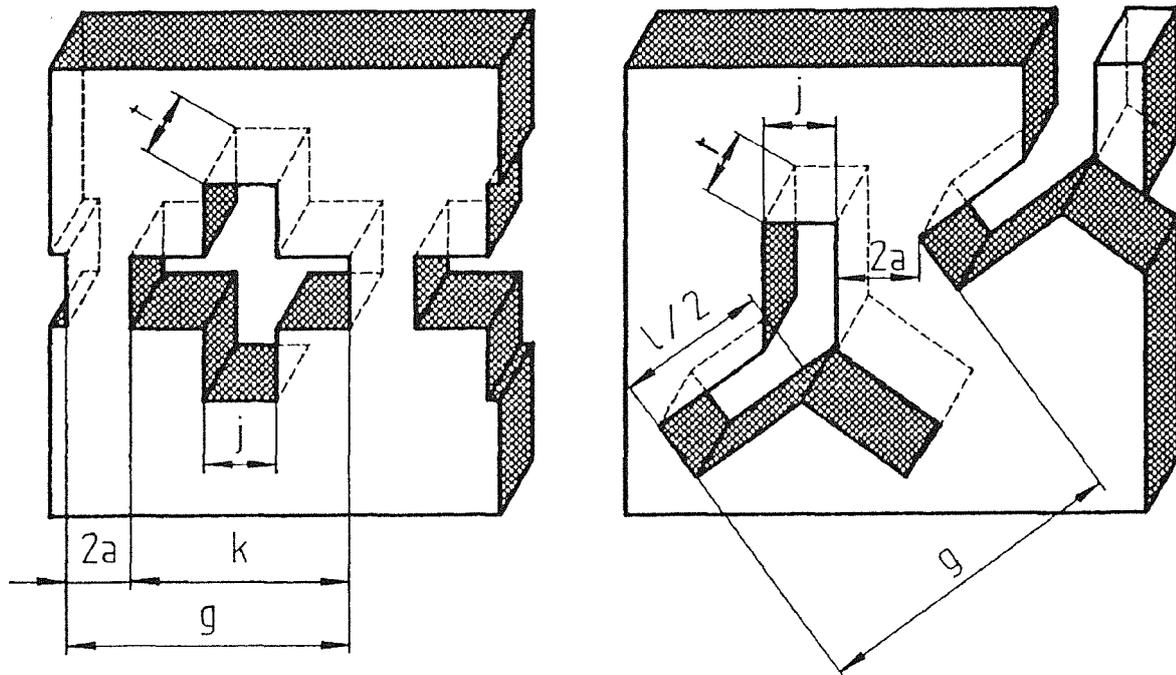


Abb. 2: Charakteristische Geometrien der Schlitzaperturen von resonanten Gittern. Das Papier stellt die Oberfläche von Filtermembranen der Filterdicke  $t$  dar. Links im Bild ist ein Ausschnitt aus einer Kreuzschlitzanordnung der Schlitzlänge  $k$  gezeichnet, rechts Tripolschlitzaperturen mit der Schenkellänge  $l/2$ , beide mit der Schlitzbreite  $j$ . Der Abstand  $2a$  der Schlitzaperturen ergibt sich aus der Schlitzgeometrie und der Gitterkonstante  $g$ .

Bandpaßfilter für den FIR-Bereich wurden bisher nur für erdgebundene astronomische Beobachtungen mit Hilfe von lichteptischer Lithographie hergestellt. Dabei wurden Kreuzschlitzaperturen durch Metallätzen oder Galvanoformung erzeugt.

Eine gute Filterqualität konnte beim Metallätzen nur bei dünnen Filterfolien (bis ca.  $1 \mu\text{m}$  Dicke) erzielt werden. Bei diesem Verfahren wird der Photolack, der als Ätzmaske dient, durch den isotropen Ätzvorgang im Bereich der Schlitzaperturen teilweise unterätzt. Dadurch werden die Schlitzaperturen in der Metallfolie größer als im Photolack und ihre Kanten verrundet. Da diese Filter mechanisch sehr empfindlich sind, werden sie häufig auf einem Träger aus nichtleitendem Material erzeugt [9,10], das jedoch als Dielektrikum wirkt und die Transmissionseigen-

schaften der Filter beeinflussen kann /12/. In Abb. 3 sind zwei Filterstrukturen abgebildet, die durch Ätzen hergestellt wurden.

Die durch Metallätzen erzeugten selbsttragenden Bandpaßfilter besitzen für anspruchsvolle Anwendungen, wie z. B. für ISOPHOT, ein unzureichendes Sperrverhalten und eine zu geringe Trennschärfe.

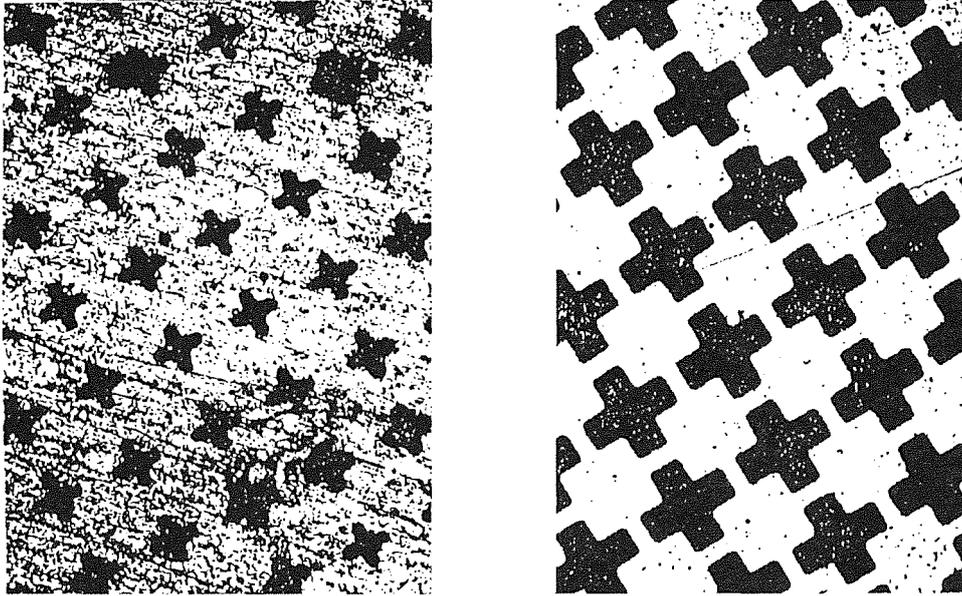


Abb. 3: Lichtmikroskopische Aufnahme von Bandpaßfiltern, die durch Ätzen von Metallfolien hergestellt wurden /9/. Links ist ein freitragendes, 4  $\mu\text{m}$  dickes Nickelfilter mit  $g = 330 \mu\text{m}$  zu sehen. Rechts ist ein 0,5  $\mu\text{m}$  dickes Filter aus Aluminium mit  $g = 400 \mu\text{m}$  abgebildet, das von einer 10  $\mu\text{m}$  dicken Mylarfolie getragen wird. Im Nickelfilter wurden einige Kreuzschlitze zu fast kreisrunden Löchern geätzt, die übrigen besitzen eine stark gerundete Form im Vergleich zu den Kreuzschlitzen im dünneren Aluminiumfilter.

Ein besseres Verfahren zur Herstellung von selbsttragenden Infrarotbandpaßfiltern ist die galvanische Abscheidung einer Filterstruktur auf ein leitfähiges Substrat in eine komplementäre Struktur aus Photolack. Nach der Galvanoformung wird der Photolack entfernt und die Filterstruktur in einem Lift-Off-Prozeß vom Substrat getrennt /8/. Dies erfordert eine stabile, dicke Filterstruktur. Die Filterdicke wird jedoch durch den nicht beliebig dick auftragbaren Photolack (typisch ist eine Schichtdicke von 2  $\mu\text{m}$ ) und die Geometrie der Schlitzaperturen beschränkt. Wächst der galvanische Niederschlag über die Dicke des Photolacks

hinaus, so findet ein Überwachsen der Photolackstrukturen statt (s. Abb. 4). Dies verengt und verkürzt die Schlitzaperturen. Bei sehr kleinen Abmessungen können die Aperturen ganz zuwachsen. Deshalb konnten mit diesem Verfahren bisher nur Filterstrukturen mit einer Gitterkonstante von minimal  $34\ \mu\text{m}$  hergestellt werden /8/.



Abb. 4: Die Skizzen zeigen zur Verdeutlichung der Ausführungen im Text Resiststrukturen (schwarz) als Komplementärstrukturen der Schlitzaperturen, die durch elektrolytische Abscheidung von Metall (grau) auf dem elektrisch leitenden Substrat gerade übergalvanisiert werden. Bei kleinen Schlitzbreiten, d. h. bei schmalen Resiststrukturen (rechts), besteht die Gefahr, daß der galvanische Niederschlag über den Resiststrukturen zusammenwächst.

Die mit diesem Herstellungsverfahren erzeugten selbsttragenden Bandpaßfilter können bei ISOPHOT für einen Meßbereich eingesetzt werden, dessen niederfrequente Grenzfrequenz mit der niederfrequenten Empfindlichkeitsgrenze des Detektors zusammenfällt. Die Trennschärfe der Bandpaßfilter wird durch die steil ansteigende Empfindlichkeit des Detektors im niederfrequenten Spektralbereich unterstützt. Deshalb wird an die Transmissionscharakteristik der zugehörigen Bandpaßkurven - im Gegensatz zu der in Abb. 1 - eine geringe Anforderung hinsichtlich der Trennschärfe und des Sperrverhaltens gestellt.

Soll die niederfrequente Grenzfrequenz des gewünschten Meßbereichs hingegen bei höheren Frequenzen liegen als die Empfindlichkeitsgrenze des Detektors (s. Abb. 1), so sind Bandpaßfilter mit besserer Trennschärfe und besserem Sperrverhalten zu erzielen, um den Meßbereich von den benachbarten Spektralbereichen gut abzugrenzen.

Aus Berechnungen der Transmissionskurven von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen ist bekannt /11/, daß die Trennschärfe von Bandpaßfiltern und gleichzeitig das Sperrverhalten sowohl durch schlankere Schlitzaperturen, als auch

entscheidend durch Erhöhung der Filterdicke verbessert werden kann. Letzteres konnte bisher jedoch nicht experimentell nachgewiesen werden, da ein geeignetes Herstellungsverfahren zur Erzeugung von Infrarotbandpaßfiltern, die wesentlich dicker sind als ein Zehntel der Gitterkonstante, nicht zur Verfügung stand.

Mit dem im Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelten LIGA-Verfahren /1/ werden Mikrostrukturen mit minimalen lateralen Abmessungen im Mikrometerbereich bei einem Aspektverhältnis<sup>7</sup> von z. Zt. ca. 100 hergestellt. Durch Röntgentiefenlithographie wird ein Resist von einigen hundert  $\mu\text{m}$  Dicke auf einem leitfähigen Substrat strukturiert. In den durch die Entwicklung freigelegten Bereichen der Resiststruktur wird durch Mikrogalvanoformung Metall in der gewünschten Schichtdicke abgeschieden. Nach Entfernen des restlichen Resists (Strippen) und Ablösen des Substrats erhält man eine selbsttragende Mikrostruktur. Diese Mikrostruktur zeichnet sich neben einem großen Aspektverhältnis durch hohe laterale Strukturtreue und Parallelität der Strukturwände aus /2/. Die kleinsten noch darstellbaren lateralen Dimensionen liegen im Submikrometerbereich.

Mit den Strukturierungsmöglichkeiten des LIGA-Verfahrens sollten Bandpaßfilter mit einer gegenüber den oben beschriebenen Filtern kleineren lateralen Geometrie und deutlich größeren Filterdicke hergestellt werden. Für diese Filter konnte im interessierenden Spektralbereich ein gutes Sperrverhalten und eine hohe Trennschärfe erwartet werden.

Die **wissenschaftliche Aufgabenstellung** für die vorliegende Arbeit bestand darin, selbsttragende Filterstrukturen mit lateralen Abmessungen im Mikrometerbereich nach dem LIGA-Verfahren herzustellen. Es sollten Bandpaßfilter mit gegenüber herkömmlichen Filtern verkleinerten Schlitzgeometrien und deutlich größerer Filterdicke erzeugt werden. Die Transmissionscharakteristik der LIGA-Filter<sup>8</sup> sollte unter Variation der Filterdicke und des Materials gemessen und mit den in der Literatur beschriebenen experimentellen und theoretischen Untersuchungen verglichen werden.

Daneben sollte eine Möglichkeit erarbeitet werden, die optimierten LIGA-Filter so auf einem ISOPHOT-spezifischen Blendenring zu fixieren, daß sie freitragend auf

-----  
<sup>7</sup> Verhältnis der Strukturdicke zu der kleinsten lateralen Abmessung:  $t/2a$

<sup>8</sup> Als 'LIGA-Filter' werden im folgenden Infrarotbandpaßfilter bezeichnet, die nach dem LIGA-Verfahren hergestellt wurden.

dem Blendenring den Beanspruchungen einer Weltraummission hinsichtlich Temperatur und Beschleunigung standhalten werden.

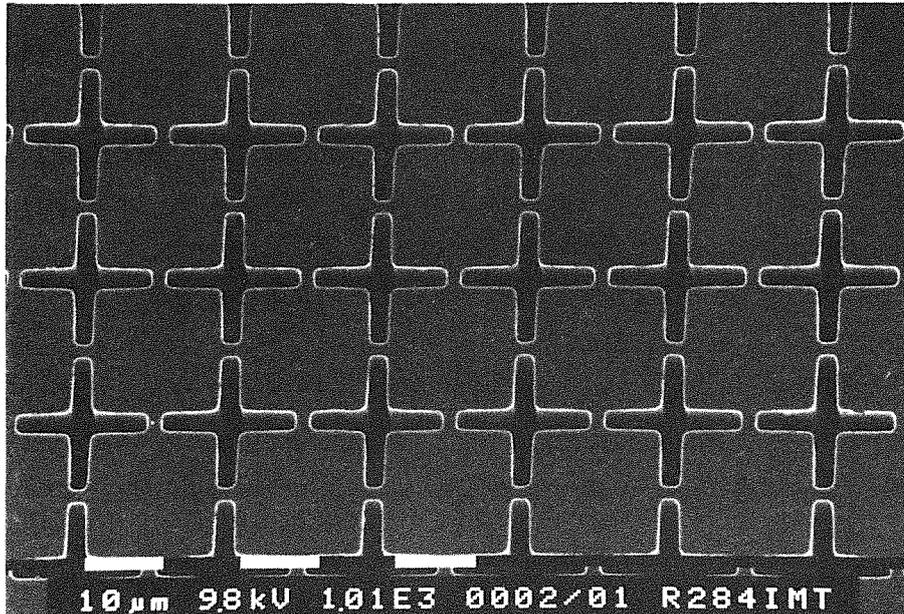


Abb. 5: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines 20 µm dicken Infrarotbandpaßfilters aus Kupfer mit Kreuzschlitzaperturen, hergestellt nach dem LIGA-Verfahren. Die Schlitzbreite beträgt 3 µm, die Schlitzlänge 18,5 µm und die Gitterkonstante 20 µm.

Im Verlauf der Arbeit wurden selbsttragende LIGA-Filter aus den Materialien Kupfer, Gold und Nickel hergestellt (s. Abb. 5). Es wurden Filterstrukturen mit unterschiedlichen Schlitzaperturen hergestellt, deren laterale Abmessungen deutlich kleiner waren als diejenigen, die mit bisherigen Herstellungsverfahren erzeugt wurden. Die gefertigten LIGA-Filter mit Kreuzschlitzaperturen haben eine Schlitzlänge von 18,5 µm und eine Schlitzbreite von 3 µm. Die Gitterkonstante beträgt 20 µm. Daraus ergibt sich ein minimaler Abstand von 1,5 µm zwischen den Kreuzschlitzaperturen. Weiterhin wurden Filterstrukturen mit je zwei verschiedenen Tripolschlitzaperturen ('KT' und 'GT') hergestellt. Auch deren Gitterkonstanten sind mit 14,5 µm ('KT') bzw. 24,5 µm ('GT') signifikant kleiner als die Gitterkonstanten von bisher hergestellten Filterstrukturen. Die lateralen Maße dieser drei LIGA-Filter sind in Tab. 1 aufgelistet.

Die Filterdicke wurde im Bereich zwischen 2 und 29  $\mu\text{m}$  variiert. Das Aspektverhältnis<sup>7</sup> lag zwischen 1,3 und 21. Um Filter unterschiedlicher Abmessungen vergleichen zu können, wurden normierte Größen, wie z. B. die 'normierte Filterdicke  $t/g$ ' (Filterdicke  $t$  bezogen auf die Gitterkonstante  $g$ ) eingeführt /11,15/. Die normierten Filterdicken der LIGA-Filter  $t/g$  betragen 0,14 bis 1,7.

Schlitzaperturform der LIGA-Filter	Kreuze	Tripole 'KT'	Tripole 'GT'
Gitterkonstante $g$	20,0 $\mu\text{m}$	14,5 $\mu\text{m}$	24,5 $\mu\text{m}$
Schlitzlänge $k$ bzw. $l/2$	18,5 $\mu\text{m}$	11,5 $\mu\text{m}$	17,0 $\mu\text{m}$
Schlitzbreite $j$	3,0 $\mu\text{m}$	3,0 $\mu\text{m}$	5,0 $\mu\text{m}$
Abstand der Aperturen $2a$	1,5 $\mu\text{m}$	0,9 $\mu\text{m}$	3,7 $\mu\text{m}$
Filterdicke $t$	2 $\mu\text{m}$ - 29 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$ - 19 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$ - 23 $\mu\text{m}$
relative Filterdicke $t/g$	0,1 - 1,45	0,14 - 1,31	0,33 - 0,94
Aspektverhältnis <sup>7</sup> (min. - max.)	1,3 - 19	2 - 21	1,6 - 6

Tab. 1: Laterale Abmessungen von LIGA-Filtern, mit denen eine Filterdickenvariation durchgeführt wurde

Zur Beurteilung der LIGA-Filter wurden ihre Infrarot-Transmissionsspektren<sup>9</sup> aufgenommen. Aus den Messungen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

Es konnte kein Einfluß des **Materials** an Filtern gleicher Geometrie auf das Transmissionsverhalten gemessen werden. Diese Erkenntnis stimmt mit den Ergebnissen der Berechnungen /31/ an einem idealisiert simulierten Hohlleiter mit kreuzförmigem Querschnitt überein.

Je nach **Filterdicke** zeigen die Transmissionskurven von LIGA-Filtern mit Kreuzschlitzaperturen ein oder mehrere Transmissionsmaxima (s. Abb. 6). Die Lage des Hauptmaximums<sup>10</sup> ist von der Filterdicke nahezu unabhängig. Mit zunehmender Filterdicke weist die Transmissionskurve von Filtern mit Kreuzschlitzaperturen neben dem Hauptmaximum weitere Maxima bei höheren Frequenzen auf. Für

<sup>9</sup> Die FIR-Transmissionsmessungen wurden mit einem FT-IR Spektrometer durchgeführt. (Fouriertransformations- Infrarotspektrometer: Hersteller: Fa. Bruker, Karlsruhe, Typ IFS 88, Meßbereich 20 - 4500  $\text{cm}^{-1}$ , spektrale Auflösung ca. 0,01  $\text{cm}^{-1}$ ).

<sup>10</sup> Als Hauptmaximum wird in dieser Arbeit das Maximum bei der niedrigsten Frequenz im Paßband bezeichnet.

normierte Filterdicken  $t/g \geq 0,5$  wurden drei und mehr Maxima gemessen, deren Abstand zum Hauptmaximum sich mit zunehmender Filterdicke verringert. Zusätzlich nimmt die Transmission der dem Hauptmaximum folgenden Maxima mit steigender Filterdicke zu.

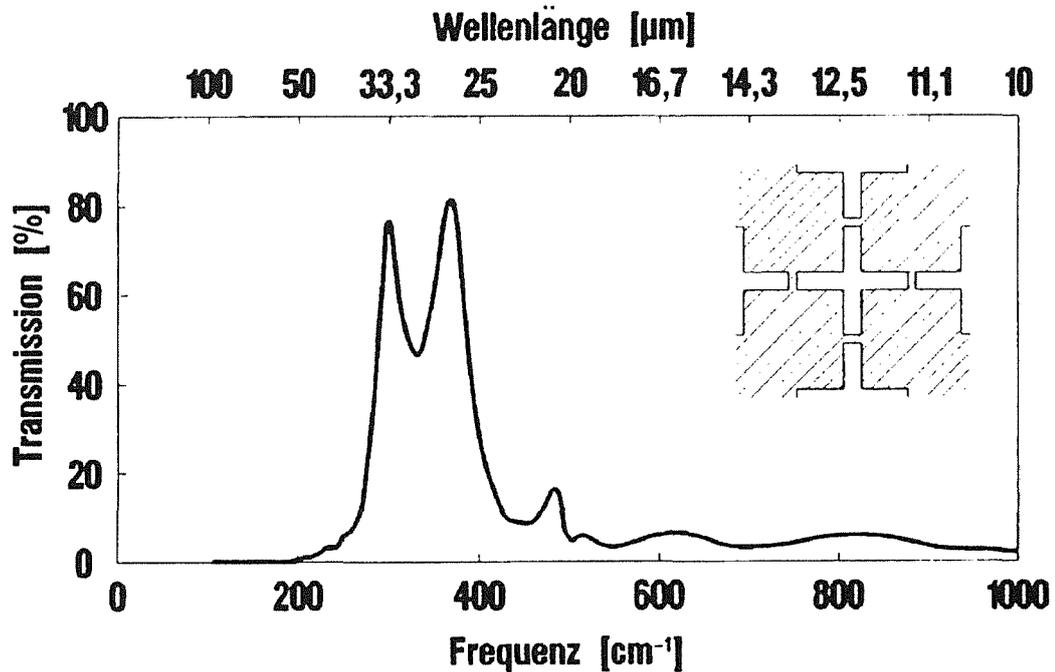


Abb. 6: Transmissionskurven eines LIGA-Filters aus Kupfer mit Kreuzschlitzaperturen. Für dieses 20  $\mu\text{m}$  dicke Filter wurden zwei deutliche Maxima mit ca. 80 % Transmission gemessen. Die Steilheit der niederfrequenten Flanke ist groß, das Sperrverhalten gut. Zwischen 100  $\text{cm}^{-1}$  und 200  $\text{cm}^{-1}$  wurden Transmissionswerte unter 1 % ermittelt.

Mit zunehmender Filterdicke verbessert sich das Sperrverhalten<sup>5</sup> der LIGA-Filter zum niederfrequenten Bereich. In diesem Bereich werden für Filter mit einer Dicke, deren Maß ungefähr der Größe der Schlitzlänge entspricht, schon zwei Halbwertsbreiten (des Hauptmaximums) vom Hauptmaximum entfernt Transmissionswerte deutlich unter 1 % gemessen. Zusätzlich ergibt sich bei großer Filterdicke eine gute Trennschärfe<sup>3</sup> und ein hoher Kontrast<sup>4</sup> (s. Abb. 6).

Die experimentellen Ergebnisse an LIGA-Filtern stimmen mit den Berechnungen von Transmissionskurven simulierter Filter mit Kreuzschlitzaperturen gut überein /11/.

Vergleichbare experimentelle Ergebnisse wurden auch an LIGA-Filtern mit Tripolschlitzaperturen erhalten. Auch an diesen Filtern wurden Transmissionskurven mit

zwei und mehr Maxima ermittelt.

In der Literatur konnten keine Berechnungen von selbsttragenden Bandpaßfiltern mit Tripolschlitzaperturen gefunden werden.

Anhand der Transmissionskurven der LIGA-Filter, die sich durch die Variation der Filterdicke ergaben, wurden in Absprache mit dem Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, für ISOPHOT je acht gleiche Bandpaßfilter mit drei unterschiedlichen Schlitzaperturen hergestellt.

Dabei wurde die Filterdicke der Bandpaßfilter so gewählt, daß die Frequenz des Transmissionsminimums, das dem Hauptmaximum folgt, mit der Grenzfrequenz der Tiefpaßfilter, die bei ISOPHOT eingesetzt werden sollen, zusammenfällt (s. Kap. 5.3).

Schlitzaperturform der LIGA-Filter	Kreuze	Tripole 'KT'	Tripole 'GT'
Gitterkonstante $g$	20,0 $\mu\text{m}$	14,5 $\mu\text{m}$	24,5 $\mu\text{m}$
Schlitzlänge $k$ bzw. $l/2$	18,5 $\mu\text{m}$	11,5 $\mu\text{m}$	17,0 $\mu\text{m}$
Schlitzbreite $j$	3,0 $\mu\text{m}$	3,0 $\mu\text{m}$	5,0 $\mu\text{m}$
Filterdicke $t$	<b>20,0 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>11,5 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>20,0 <math>\mu\text{m}</math></b>

Tab. 2: Geometrische Maße der Schlitzaperturen der Infrarotbandpaßfilter, die mit dem LIGA-Verfahren für ISOPHOT hergestellt wurden.

Die Besonderheit der Bandpaßfilter für ISOPHOT ist ihre Integration mit einem Blendenring aus massivem Elektrolytkupfer (s. Kap. 3). Durch Variation der Prozeßschritte bei der Herstellung nach dem LIGA-Verfahren wurden auf zwei unterschiedliche Arten LIGA-Filter aus Kupfer freitragend auf Blendenringen hergestellt.

Diese Filter mit Blendenring wurden durch einen Eignungstest für ISOPHOT qualifiziert, der die Einsatzbedingungen von ISO im Weltraum bezüglich thermischer und mechanischer Beanspruchung simulieren soll. Die Filter bestanden diese Tests ohne Beschädigung und wurden für den Einbau in die Filterräder von ISOPHOT freigegeben.

## 2. Darstellung der bekannten experimentellen und theoretischen Untersuchungen an Filtern für das Ferne Infrarot

Bandpaßfilter sind Bauteile, die von einfallender elektromagnetischer Strahlung einen bestimmten Frequenzbereich (Paßband) durchlassen, während die Strahlungsanteile mit Frequenzen, die außerhalb des Paßbands liegen, unterdrückt werden. Ein idealer Bandpaß besitzt als Transmissionskurve ein Rechteckprofil mit 100 % Transmission im Paßband und völlige Unterdrückung in den dem Paßband benachbarten Spektralbereichen.

### 2.1 Historische Entwicklung

Die Anregung zur Erzeugung von Bandpaßfiltern aus strukturierten Metallmembranen gab ein Bauteil der Mikrowellentechnik, die sogenannte frequenzselektive Oberfläche (frequency selective surface). Sie besteht aus einer periodischen Anordnung von isoliert stehenden Leiterelementen, z. B. metallische Kreuze (= gekreuzte Dipole) auf einem nichtleitenden Träger, wie z. B. Mylar<sup>11</sup> oder Polyethylen (s. Abb. 7 links).

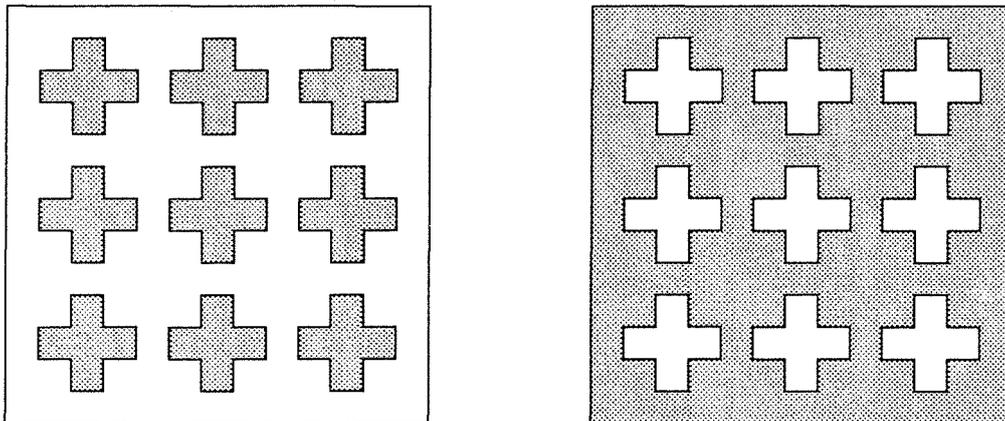


Abb. 7: Prinzipdarstellung einer frequenzselektiven Oberfläche mit gekreuzten Dipolen (links) und eines Bandpaßfilters mit Kreuzschlitzaperturen (rechts). Die grau gefüllten Flächen bestehen jeweils aus Metall, die weißen Flächen aus einem infrarottransparenten Material<sup>12</sup>.

Berechnungen /16/ und Messungen /7,17/ des Transmissionsverhaltens von frequenzselektiven Oberflächen mit gekreuzten Dipolstrukturen ergaben ein ausgeprägtes Transmissionsminimum bei der Wellenlänge  $\lambda_p \approx 2 \cdot L_D$  mit  $L_D$  als

<sup>11</sup> Mylar: Polyethylenterephthalat von Du Pont

<sup>12</sup> Bei Bandpaßfiltern kann das infrarottransparente Material durch Luft oder Vakuum ersetzt werden, indem das Filter selbsttragend gefertigt wird.

Dipollänge /13/. Frequenzselektive Oberflächen können deshalb als Bandsperrfilter<sup>13</sup> verwendet werden. Da die Lage des Transmissionsminimums mit der Länge der Kreuzschlitze skaliert, konnte sie über die obige Beziehung recht gut vorherbestimmt werden. Die Skalierbarkeit bedeutet, daß beim Vergrößern bzw. Verkleinern der Strukturen die charakteristische Wellenlänge  $\lambda_p$  für das - in diesem Fall - ausgeprägte Minimum proportional zu größeren bzw. kleineren Wellenlängen hin verschoben wird, ohne daß eine wesentliche Änderung der sonstigen Filtercharakteristik, d. h. der Form der Transmissionskurve, auftritt. In Abb. 8 sind die Transmissionskurven zweier frequenzselektiven Oberflächen mit unterschiedlichen Kreuzstrukturen aus Aluminium auf einem Calciumfluorid-Träger darstellt.

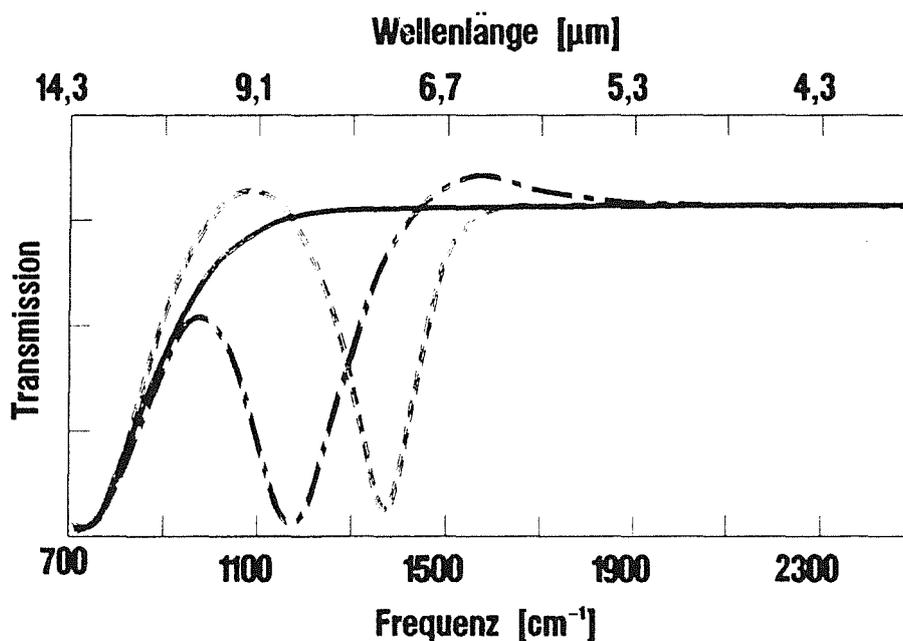


Abb. 8: Transmissionsprofile von frequenzselektiven Oberflächen mit gekreuzten Dipolen nach Rhoads et al. /13/, die als Bandsperrfilter im Infrarotbereich eingesetzt werden können. Die Transmissionskurve eines Bandsperrfilters mit 3  $\mu\text{m}$  langen Kreuzen ist kurzgestrichelt (Transmissionsminimum bei 1360  $\text{cm}^{-1}$ ) und die eines Sperrfilters mit 3,9  $\mu\text{m}$  langen Kreuzen (Minimum bei 1180  $\text{cm}^{-1}$ ) strichpunktiert eingezeichnet. Als Träger für die 0,14  $\mu\text{m}$  dünnen Aluminiumkreuze wurde ein 1 mm dickes Calciumfluorid-Substrat verwendet, dessen Infrarottransmission als Referenz (durchgezogene Linie) angegeben ist.

<sup>13</sup> Bandsperrfilter unterdrücken einen bestimmten Frequenzbereich, während die Strahlung benachbarter Spektralbereiche ungehindert das Filter passieren.

Das Komplement einer frequenzselektiven Oberfläche mit gekreuzten Dipolen ist eine Metallmembran, die mit Kreuzschlitzaperturen versehen ist (s. Abb. 7 rechts).

Das sogenannte Prinzip von Babinet /18, 19/ besagt, daß die Intensität einer elektromagnetischen Welle, die ein Gitter durchstrahlt, gleich der Intensität der Welle ist, die vom komplementären Gitter reflektiert wird, unabhängig vom Wellenlängenbereich der einfallenden Strahlung und von den absoluten geometrischen Maßen der Gitterstrukturen<sup>14</sup>. Nach diesem Prinzip ist zu erwarten, daß die Metallmembran mit Kreuzschlitzaperturen Bandpaßeigenschaften besitzt (z. B. /7/). Daraus folgt, daß diese Struktur bei der Wellenlänge, deren Wert der doppelten Schlitzlänge entspricht, ein Transmissionsmaximum aufweisen sollte. Der Nachweis, daß diese strukturierten Metallmembranen Bandpaßeigenschaften besitzen, wurde zunächst experimentell erbracht /30/. Die dabei gewonnenen Ergebnisse bezüglich der Filtercharakteristik in Abhängigkeit von der lateralen Geometrie werden im folgenden Abschnitt zusammengefaßt.

## 2.2 Experimentelle Untersuchungen an Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen

Mit Hilfe der lichteptischen Lithographie bestand die Möglichkeit, Bandpaßfilter mit Kreuzschlitzaperturen für den Infrarotbereich herzustellen. Durch Transmissionsmessungen wurde der Einfluß der lateralen Geometrie der Schlitzaperturen auf die Filtercharakteristik untersucht /8-10/. Im folgenden werden die Ergebnisse einiger Arbeiten beschrieben, aus denen sich schließlich die Anforderungen an die laterale Geometrie der Filter ergeben haben, die bei ISOPHOT als Infrarotbandpässe eingesetzt werden sollen.

### 2.2.1 Ergebnisse aus den Experimenten von Cunningham /10/

Cunningham stellte Bandpaßfilter durch Ätzen von Kreuzschlitzen in eine 300 nm dicke Kupferschicht her, die von einer 2,5 µm dicken Mylarfolie getragen wurde. In seinen Experimenten wurde die Gitterkonstante von ca. 100 µm bis 700 µm variiert, wodurch jeweils ein Transmissionsmaximum zwischen 8,3 und 40 cm<sup>-1</sup> gemessen werden konnte. Für Bandpaßfilter mit einem Transmissionsmaximum bei

-----  
<sup>14</sup> Das Prinzip von Babinet gilt für dünne Gitter und unter der Voraussetzung, daß das komplementäre Gitter in seiner Ebene um 90° gegenüber dem ursprünglichen Gitter gedreht wurde. Für Strukturen, die zu zwei senkrecht aufeinanderstehenden Achsen symmetrisch sind (zweizählige Symmetrie), wie z. B. für Kreuze, ist letzteres gegenstandslos.

einer Frequenz von ca.  $10 \text{ cm}^{-1}$  wurden Intensitäten von 90 % bis nahezu 100 % gemessen. Cunningham wies darauf hin, daß beim Überätzen an den Schlitzaperturen stark gerundete Ecken und Kanten auftraten, wodurch die Intensität im Transmissionsmaximum reduziert wurde. Die Transmissionsmessungen wurden sowohl im Bereich des Paßbands als auch bei höheren Frequenzen durchgeführt.

Mit zunehmender Gitterkonstante wird das Transmissionsmaximum zu größeren Wellenlängen hin verschoben. Es wurde nachgewiesen, daß im Wellenlängenbereich von  $250 \text{ }\mu\text{m}$  bis  $1200 \text{ }\mu\text{m}$  die Bandpaßfilter skalierbar sind, d. h. die Lage des Transmissionsmaximums aus der lateralen Geometrie vorausberechnet werden kann. Cunningham ermittelte aus seinen Versuchsergebnissen folgende empirische Formel für die Lage des Hauptmaximums  $\lambda_p$ :

$$\lambda_p = 2,2 \cdot g - 3,1 \cdot (1,1 \cdot a + j/2) \quad (1)$$

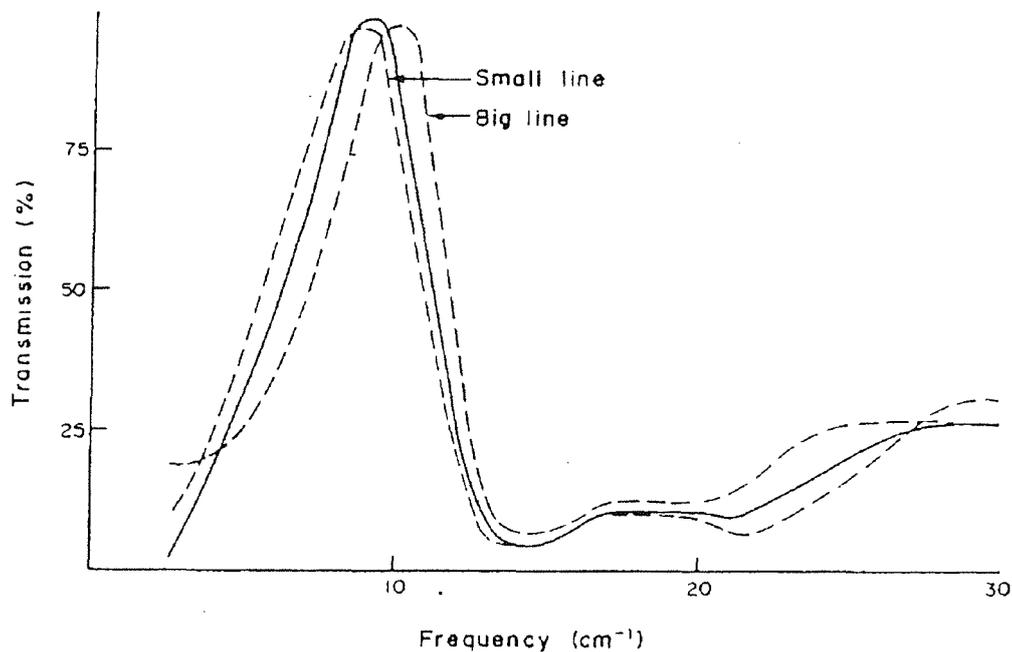


Abb. 9: Transmissionsmessungen an Filtern mit Kreuzschlitzaperturen aus der Veröffentlichung von Cunningham /10/. Die Kurvenschar zeigt die Charakteristik von Filtern mit unterschiedlich langen Kreuzschlitzaperturen gleicher normierter Breite ( $j/g=0,28$ ). Die gestrichelte Kurve, die mit 'small line' (kurzer Abstand  $2a$ ) gekennzeichnet ist, wurde an einem Filter mit langen Kreuzschlitzen ( $k/g=0,92$ ) gemessen. Die durchgezogene Linie repräsentiert die Meßkurve eines Filters mit mittlerer Schlitzlänge ( $k/g=0,88$ ), die gestrichelte Linie, die mit 'big line' (breiter Abstand  $2a$ ) bezeichnet wurde, die Meßkurve an einem Filter mit kurzer Schlitzlänge ( $k/g=0,82$ ).

Zusätzlich zur Variation der Gitterkonstante wurde bei fester Gitterkonstante die Kreuzschlitzform variiert, d. h. die Schlitzlänge  $k$  und die Schlitzbreite  $j$ . Cunningham stellte fest, daß mit schmaler werdenden Schlitzaperturen sich das Transmissionsmaximum zu niedrigeren Frequenzen verlagert. Gleichzeitig nimmt die Trennschärfe der Bandpaßfilter zu. Auch bei kürzeren metallischen Verbindungsstegen zwischen den Schlitzaperturen, d. h. bei längeren Kreuzschlitzen, tritt das Maximum bei niedrigeren Frequenzen auf (s. Abb. 9). Die Trennschärfe des Bandpaßfilters nimmt bei längeren Schlitzen nur geringfügig zu.

### 2.2.2 Ergebnisse aus den Experimenten von Chase und Joseph /9/

Ebenfalls 1983 führten Chase und Joseph Versuche sowohl an dünnen, geätzten Aluminiumstrukturen auf 1,5 , 10 und 15  $\mu\text{m}$  dicken Mylarfolien als auch an freistehenden Filterstrukturen durch, die in eine 4  $\mu\text{m}$  dicke Nickelfolie geätzt waren. Sie stellten Bandpaßfilter für den Wellenlängenbereich von 450 bis 800  $\mu\text{m}$  (Frequenzbereich 12,5 bis 22  $\text{cm}^{-1}$ ) her. An den Filtern mit guter rechteckiger Form der Kreuzschlitze wurden Transmissionswerte im Maximum von über 80 % gemessen (s. Abb. 10).

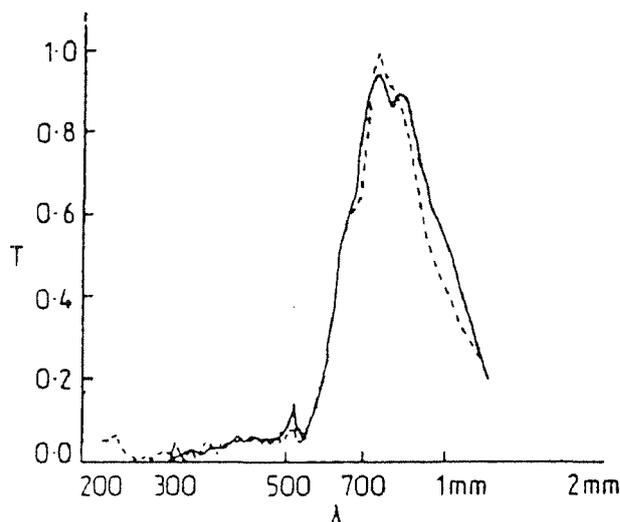


Abb. 10: Transmissionskurven von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen aus der Veröffentlichung von Chase und Joseph /9/. Es sind die Transmissionskurven zweier Filter dargestellt, die mit derselben Maske durch lichtoptische Lithographie und Metallätzen hergestellt wurden.

Durch die Variationen aller lateralen Geometrieparameter ( $g$ ,  $k$ ,  $j$ ) konnten Chase und Joseph zeigen, daß die Wellenlänge des Transmissionsmaximums eine Funktion der Geometrie der Kreuzschlitze ist und nicht durch die Gitterkonstante bestimmt wird. Die Schlitzlänge  $k$  hat einen größeren Einfluß auf die Wellenlänge

des Transmissionsmaximums als andere Geometrieparameter. Sind die Kreuzschlitze sehr schmal oder kurz ( $j/2a < 1$ ), so tritt das Transmissionsmaximum bei einer Wellenlänge auf, die etwa der doppelten Kreuzschlitzlänge entspricht. Bei breiten oder sehr langen Kreuzen ( $j/2a > 1$ ) tritt das Maximum bei kleineren Wellenlängen  $\lambda_p$  auf (vgl. Tab. 3).

$$\lambda_p \approx 2,1 k \quad (j/2a < 1) \tag{2}$$

$$\lambda_p \leq 2,1 k \quad (j/2a \geq 1)$$

Bandpaßfilter mit einer besseren Trennschärfe erhielten Chase und Joseph durch die Erzeugung von schmaleren und längeren Kreuzschlitzaperturen. Die Trennschärfe und das Sperrverhalten der unter /9/ und /10/ beschriebenen, durch Metallätzen hergestellten Bandpaßfilter genügen jedoch nicht den Anforderungen von ISOPHOT.

In /9/ wurde nicht unterschieden zwischen freitragenden Filtern und solchen, die mit einer Mylarfolie unterstützt waren. Deshalb ist anzunehmen, daß bei der Ermittlung der empirischen Formeln der Einfluß des Substrats nicht berücksichtigt wurde. Daß jedoch ein solcher Einfluß vorhanden ist, wurde durch Untersuchungen von Whitbourn und Compton /12/ bestätigt. Insofern scheint die Gültigkeit der in /9,10/ angegebenen Formeln für selbsttragende Filter nicht gesichert.

### 2.2.3 Ergebnisse aus den Experimenten von Gemünd /8/

1986 veröffentlichte Gemünd experimentelle Ergebnisse, die an freitragenden, galvanisierten Filterstrukturen - im Hinblick auf einen Einsatz bei astronomischen Beobachtungen - untersucht wurden (s. Abb. 11). Hier wurde die Gitterkonstante im Bereich von 47  $\mu\text{m}$  bis 912  $\mu\text{m}$  variiert und bei Wellenlängen  $\lambda_p$  Transmissionsmaxima mit 70 bis 100 % Transmission als Funktion der Kreuzschlitzlänge ermittelt:

$$1,97k < \lambda_p < 2,06 k \tag{3}$$

Die unterschiedlichen maximalen Transmissionswerte wurden mit Unregelmäßigkeiten in der Kontur der Schlitzaperturen, wie z.B. Verrundungen von rechteckigen Details erklärt, die sich an Filtern mit kleinen Kreuzschlitzaperturen ( $g=47 \mu\text{m}$ ) stärker auf die Filtercharakteristik auswirken als bei Filtern mit großen Schlitzaperturen ( $g=912 \mu\text{m}$ ).

Bandpaßfilter mit schmalen Kreuzschlitzen zeigten eine bessere Trennschärfe und ein besseres Sperrverhalten in dem dem Paßband benachbarten niederfrequenten Bereich. Das Sperrverhalten und die Trennschärfe der in /8/ dargestellten Bandpaßfilter sind jedoch dann nicht ausreichend für ISOPHOT, wenn die Meßbereichsgrenzen bei höheren Frequenzen liegen als die Empfindlichkeitsgrenzen der eingebauten Detektoren.

Für etwas breitere Kreuzschlitze fand Gemünd ein weiteres Maximum neben dem Hauptmaximum /8/ (s. Abb. 11).

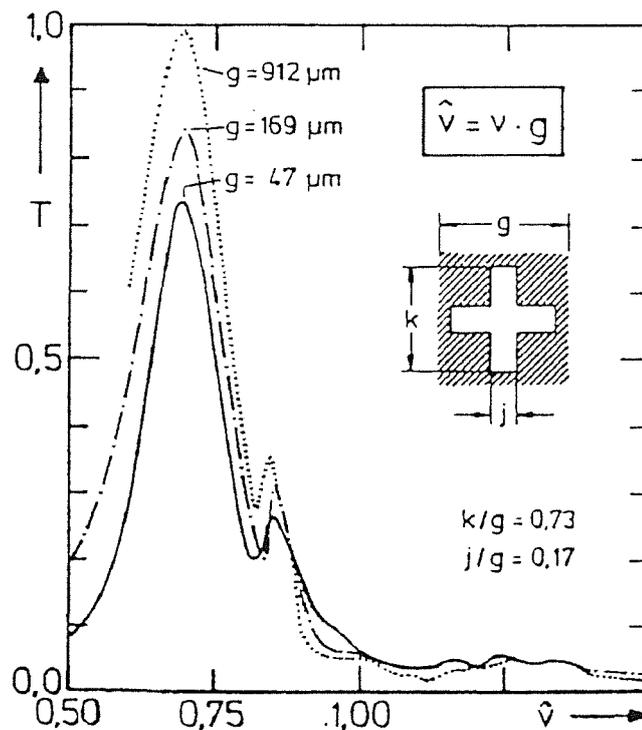


Abb. 11: Transmissionsmessung an Filtern mit Kreuzschlitzaperturen aus der Veröffentlichung von Gemünd /8/. Um die Filter mit unterschiedlichen Gitterkonstanten vergleichen zu können, wurde die Transmission als Funktion der reduzierten Wellenzahl  $\hat{v} = v \cdot g$  aufgetragen. Die Geometriedaten sind rechts angegeben. Für diese Filter mit gleichen lateralen Geometriebeziehungen wurde die Wellenlänge, bei der die maximale Transmission gemessen wurde, mit  $\lambda_p = 1,97k$  angegeben.

Die experimentellen Ergebnisse von Gemünd ( $\lambda_p \approx 2k$ ) entsprechen dem Prinzip von Babinet. Sie wurden im Gegensatz zu denen von Cunningham /10/ sowie Chase und Joseph /9/ ausschließlich an freistehenden Filterstrukturen gewonnen. Demzufolge sind die Ergebnisse unbeeinflusst von einem Trägersubstrat.

### 2.3 Berechnung der Transmission von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen

Mit der Fähigkeit, Bandpaßfilter mit Kreuzschlitzaperturen herzustellen, bestand gleichzeitig der Wunsch, das Transmissionsverhalten rechnerisch zu bestimmen. Dieser Wunsch ging über die Abschätzung der Lage des Transmissionsmaximums aus empirischen, experimentell gewonnenen Formeln und die qualitative Beschreibung der Transmissionskurve hinaus. Es wurden Modelle entwickelt, mit denen der Verlauf der Transmissionskurve näherungsweise bestimmt werden sollte, mit dem Ziel, aus einer vorgegebenen Transmissionscharakteristik die Geometrie der zu erzeugenden Kreuzschlitzaperturen von Bandpaßfiltern theoretisch bestimmen zu können.

#### 2.3.1 Elektromagnetisches Ersatzschaltbild

Im Jahr 1967 simulierte Ulrich /20,21/ verschiedene Gitter, die im folgenden vorgestellt werden, durch elektrische Ersatzschaltbilder, um ihr Transmissionsverhalten aus den Gleichungen zu bestimmen, die die elektrische Schaltung beschreiben. In die Simulation geht die Geometrie der Aperturen als äquivalente Impedanz und Kapazität ein. Dieses Modell geht auf Simulationen von Strichgittern aus Streifenleitern zurück, die 1951 von Marcuvitz /22/ durchgeführt wurden.

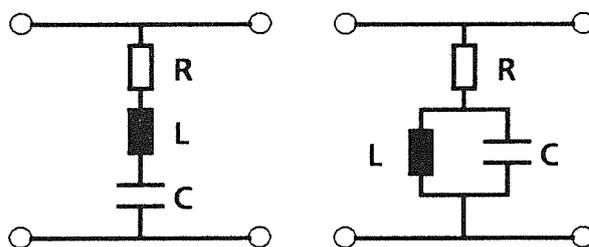


Abb. 12: Ersatzschaltbilder für ein kapazitives (links) und ein induktives Gitter (rechts) /20, 12/

Das Ersatzschaltbild einer frequenzselektiven Oberfläche, die aus einer periodischen Anordnung von z. B. metallischen Quadraten besteht, ist eine Reihenschaltung von ohmschem Widerstand  $R$ , Induktionsspule  $L$  und Kondensator  $C$  (s. Abb. 12 links) /20/. Der Kondensator ist das elektromagnetische Bauteil, das den durch die elektrische Schaltung fließenden Strom bestimmt. Deshalb wird das mit dieser Schaltung simulierte Gitter - eine frequenzselektive Oberfläche - auch als 'kapazitives Gitter' bezeichnet.

Die ihm komplementäre Struktur ist ein Gitter mit sich kreuzenden Streifen, die eine Filtermembran mit in diesem Beispiel quadratischen Lochaperturen ergeben. Sein Ersatzschaltbild (Abb. 12 rechts) besteht aus einem ohmschen Widerstand  $R$  mit einem nachgeschalteten, einfachen Schwingkreis, d. h. einer Parallelschaltung von Induktionsspule  $L$  und Kondensator  $C$  /20/. In dem für dieses Modell gültigen Frequenzbereich bestimmt die Spule den Strom in der Schaltung. Daher findet man für Gitter mit Lochaperturen auch die Bezeichnung 'induktives Gitter' /20, 22/. Das Transmissionsmaximum für ein induktives Gitter wird bei der reduzierten Wellenzahl  $\hat{\nu} = \nu \cdot g \approx 0,85$  gemessen. Für diese Frequenz ist im Schwingkreis (LC) Resonanz zu erwarten /7/. Trotzdem wird das Gitter mit einfachen, nicht schlitzförmigen Aperturen meist nur als 'einfaches, induktives Gitter' und nicht als resonantes Gitter bezeichnet, da die Resonanz nur in einem kleinen Randbereich in der Nähe der hochfrequenten Flanke zum Paßband, d. h. bei der reduzierten Wellenzahl  $\hat{\nu} = \nu \cdot g \approx 1,0$  auftritt. Ab dieser Wellenzahl beginnt für höhere Frequenzen das Beugungsgebiet. Im Beugungsbereich wird die Strahlung, die durch das Filter tritt, in den Halbraum hinter dem Filter gebeugt und deshalb nur noch teilweise vom Detektor erfaßt. Um den Resonanzbereich für Filteraufgaben besser nutzen zu können, wurde nach einem Weg gesucht, den Resonanzbereich von der Beugungskante weg zu kleineren Frequenzen hin zu verschieben /7/.

Durch Erhöhung der Kapazität im Schwingkreis kann die Resonanzfrequenz zu kleineren Frequenzen hin verschoben werden. Bei einem Gitter mit quadratischen Lochaperturen wird dies durch das Annähern der gegenüberliegenden Seiten der Lochaperturen erreicht, so daß Schlitzaperturen entstehen. Werden die Schlitzaperturen als Kreuzschlitze realisiert, so bleibt die zweizählige Symmetrie des einfachen, induktiven Gitters erhalten, und das neue resonante Gitter ist wie das einfache, induktive Gitter polarisationsunabhängig /7/. Die Resonanz für Gitter mit Kreuzschlitzaperturen liegt bei einer reduzierten Wellenzahl  $\hat{\nu} = \nu \cdot g \approx 0,5$ , also deutlich entfernt von  $\hat{\nu} = 1$ , ab der die Welle am Gitter gebeugt wird. Dies ermöglicht die Nutzung der Resonanz für Filteraufgaben ohne Störung durch Beugungseffekte /7/.

Ein resonantes, induktives Gitter (oder einfacher: resonantes Gitter) kann auch durch das Übereinanderlegen der beiden oben beschriebenen einfachen Gitter - einer frequenzselektiven Oberfläche und eines einfachen, induktiven Gitters mit quadratischen Lochaperturen - erzeugt werden (s. Abb. 13) /7/. Die kreuzweise angeordneten Streifenleiter der Breite  $2a$  eines induktiven Gitters bilden die metallischen Verbindungsstege mit der Länge ( $2a = g - k$ ) zwischen den Kreuzschlitzaperturen des resonanten Gitters. Die Größe der quadratischen Lochaper-

turen bestimmt die Schlitzlänge  $k$  der Kreuzschlitzaperturen (s. Abb. 13 links). Die Periodizität der Streifenleiter entspricht der Gitterkonstante des entstehenden resonanten Gitters. Auf die Kreuzungspunkte der Streifenleiter wird mittig eine Anordnung von Quadraten mit gleicher Gitterkonstante gelegt, deren Abstand die Schlitzbreite  $j$  festlegt (s. Abb. 13 Mitte). Dieses Verfahren zum Aufbau einer Gitterstruktur mit Kreuzschlitzaperturen wurde auch als konkreter Weg beschrieben, um eine durch lichtoptische Kopie erzeugte Resiststruktur zur Herstellung resonanter, induktiver Gitter zu erhalten /23/.

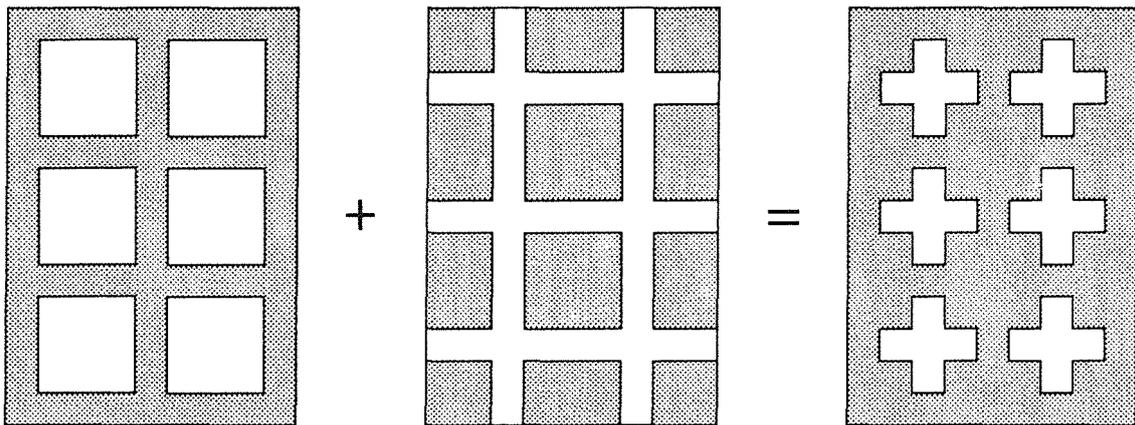


Abb. 13: Ein Bandpaßfilter mit Kreuzschlitzaperturen (rechts) kann durch Über-einanderschichten eines induktiven Gitters (links), das aus kreuzweise angeordneten Streifenleitern (grau) besteht, und einer frequenzselektiven Oberfläche (Mitte) mit Quadratstrukturen (grau) erzeugt werden /7, 23/.

Das Ersatzschaltbild eines resonanten Gitters mit Kreuzschlitzaperturen ist in der Abb. 14 dargestellt.

Im Beugungsgebiet versagt das Modell von Ulrich /7/. Für eine genauere theoretische Bestimmung der Eigenschaften von Gittern über einen uneingeschränkten Wellenlängenbereich ist es notwendig, das physikalische Modell auf ein entsprechendes klassisches Problem der Mathematik zurückzuführen, dessen Lösung direkt durch numerische Analyse erhalten werden kann. Als sehr kompliziertes Problem stellt sich dabei die Formulierung der Beugung an Gittern mit z. B. Kreuzschlitzaperturen /24/.

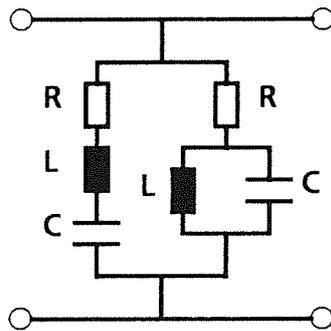


Abb. 14: Ersatzschaltbild eines resonanten, induktiven Gitters. Das Schaubild ergibt sich aus einer Parallelschaltung der Ersatzschaltbilder für eine frequenzselektive Oberfläche und für ein induktives Gitter /20/ (vgl. Abb. 12).

### 2.3.2 Theoretische Simulation von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen

Die theoretische Simulation der Transmission von Gittern mit Kreuzschlitzaperturen haben Compton et al. /11/ im Jahr 1983 behandelt. Sie berechneten unter der Annahme von perfekt leitenden Gittern endlicher Dicke die Beugung. In ihre Simulation bezogen sie nicht nur die elektromagnetischen Felder auf beiden Seiten der Filtermembran ein, sondern auch das elektromagnetische Feld in den Schlitzaperturen. Dies wird nach der Methode von Chen /25, 26/ berechnet, die eine Lochapertur eines Filters endlicher Dicke als beidseitig offenen Wellenleiter endlicher Länge behandelt. Ein weiteres Computerprogramm löst das Beugungsproblem mit Gleichungen nach McPhedran et al./27/.

Compton et al. /11/ führten eine Variation der lateralen Geometrie und der Filterdicke von selbsttragenden Filtern mit Kreuzschlitzaperturen durch. Ihre Ergebnisse wurden in dimensionsloser Darstellung veröffentlicht und sind deshalb nicht auf einen bestimmten Wellenlängenbereich beschränkt. Als dimensionslose Größe für die Wellenlänge führten sie die 'normierte Wellenlänge'  $\lambda/g$  als Quotient aus Wellenlänge und Gitterkonstante ein. Die Berechnungen wurden für normierte Wellenlängen  $0,5 \leq \lambda/g \leq 2,5$  durchgeführt. Dies entspricht bei einer Gitterkonstante  $g=20 \mu\text{m}$  einem Wellenlängenbereich von  $10 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 50 \mu\text{m}$  ( $200 \text{ cm}^{-1} \leq \nu_p \leq 1000 \text{ cm}^{-1}$ ). Im folgenden werden die Ergebnisse für einen senkrecht auf das Filter einfallenden Strahl diskutiert. Dabei werden die Transmissionskurven nullter Ordnung<sup>15</sup> betrachtet, die in dieser Arbeit experimentell ermittelt wurden. Sie entsprechen der Intensität des Strahls, der senkrecht

von der Filteroberfläche emittiert wird. Die Bandpaßfilter bestehen aus einer freitragenden Membran in Luft oder Vakuum.

### Einfluß der lateralen Geometrie

Für die vorliegende Arbeit sind die Ergebnisse aus den Simulationen von Filtern mit echten Kreuzschlitzen interessant. Diese Kreuzschlitzaperturen sind schmal und lang und erzeugen deshalb gute Bandpässe (Kapitel 2.2). Die Transmissionskurven der Filterstrukturen mit echten Kreuzschlitzaperturen zeigen im Bandpaßbereich zwei Transmissionsmaxima. Beide berechneten Maxima besitzen 100 % Transmission, da ein ideales, perfekt leitendes Filter mit scharfkantigen, rechtwinkligen Kreuzschlitzaperturen und fehlerfreien Oberflächen zugrundegelegt wurde. Bei bisherigen experimentellen Untersuchungen wurde ein zweites Maximum im Paßband nicht /9, 10/ oder nur andeutungsweise /8/ gefunden. Dies kann an einer unzureichenden Genauigkeit der hergestellten Filterstrukturen /9/, der geringen Filterdicke /13/, der endlichen Leitfähigkeit des Filtermaterials oder der geringen Auflösung der Transmissionsmessungen gelegen haben.

Für die Filter mit etwas breiteren Kreuzschlitzaperturen ( $j/k=0,32$ ) wurde bei niedrigen Frequenzen im Paßband zunächst ein breites Hauptmaximum berechnet (s. Abb. 15). Das Sperrverhalten im niederfrequenten Spektralbereich und die Trennschärfe dieses dünnen Filters ( $t/g=0,16$ ) sind mangelhaft. Die Simulation ergab ein weiteres, sehr schmales Maximum an der Beugungskante ( $\lambda/g=1$ ).

Aus experimentellen Untersuchungen ist bekannt /8-10/, daß das Sperrverhalten zu kleineren Frequenzen etwas verbessert werden kann, wenn die Schlitzaperturen schmaler hergestellt werden.

Die Simulation von Compton et al. /11/ kommt zum gleichen Ergebnis. Die berechneten Transmissionskurven zeigen, daß bei Filtern mit schmalen Schlitzaperturen ( $j/k=0,20$ ) das Hauptmaximum schmaler ist und bei etwas niedrigerer Frequenz auftritt als bei Filtern mit breiteren Schlitzaperturen (s. Abb. 16). Auch das zweite Maximum wird, wenn auch nur wenig, zu kleineren Frequenzen verschoben. Seine Halbwertsbreite nimmt mit schmaler werdenden Schlitzen nur wenig zu. Für Bandpaßfilter mit schmalen Kreuzschlitzaperturen wurde eine etwas bessere Trennschärfe, jedoch ein (fast unverändert) mangelhaftes Sperrverhalten berechnet.

---

<sup>15</sup> Der Strahl nullter Ordnung erreicht ungebeugt den Detektor. Sein Verlauf deckt sich mit der gedachten Achse, die Strahlungsquelle, Filter und Detektor verbindet.

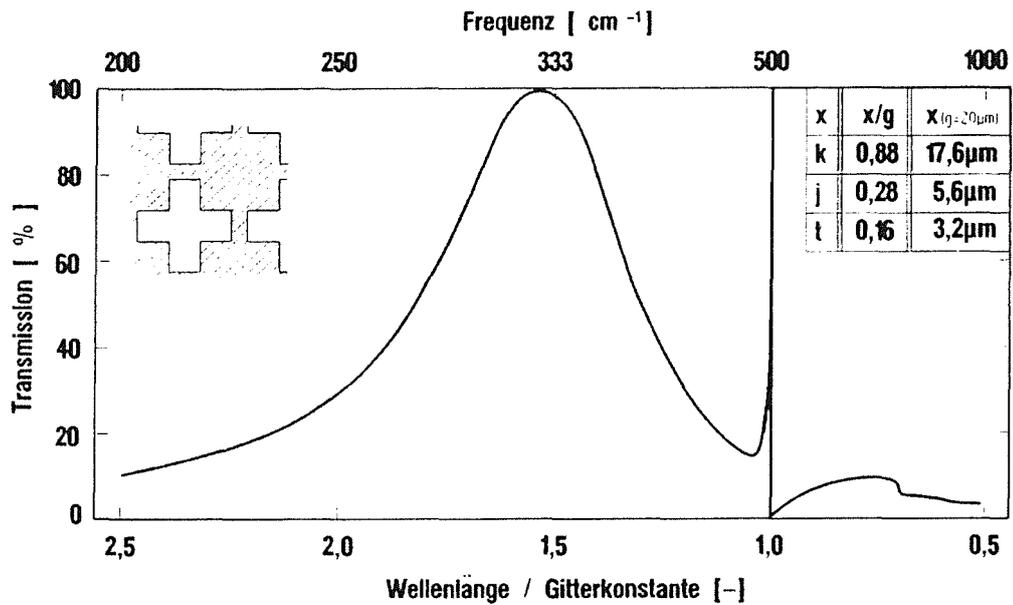


Abb. 15: Berechnete Transmissionskurve eines dünnen Filters ( $t/g=0,16$ ) mit breiten Kreuzschlitzaperturen ( $j/k=0,32$ ) nach Compton et al. /11/. Die Transmissionskurve besitzt zwei Maxima. Dem Hauptmaximum bei  $\lambda/g=1,54$  folgt ein zweites mit verschwindend kleiner Halbwertsbreite an der Beugungskante  $\lambda/g=1$ .

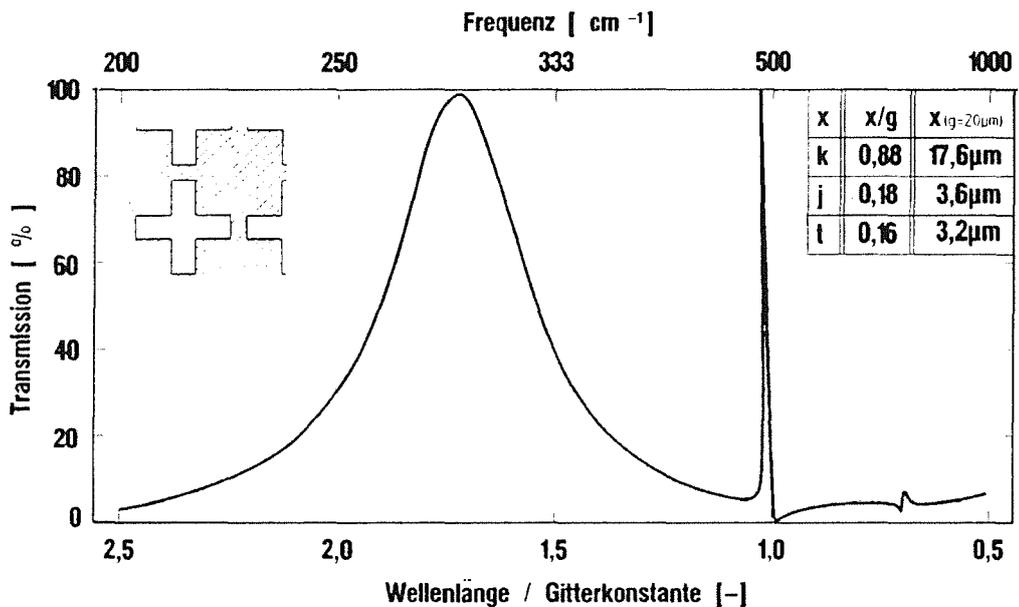


Abb. 16: Berechnete Transmissionskurve eines dünnen Filters ( $t/g=0,16$ ) mit schmalen Kreuzschlitzaperturen ( $j/k=0,20$ ) nach Compton et al. /11/. Das Hauptmaximum liegt bei  $\lambda/g=1,69$ . Das zweite Maximum hat sich etwas dem Hauptmaximum genähert ( $\lambda/g=1,02$ ).

### Einfluß der Dicke der Filterstrukturen

Wesentlich bessere Transmissionseigenschaften sollen Bandpaßfilter besitzen, die aus einer dickeren Filterstruktur bestehen /11/. In den Simulationsberechnungen von Compton et al. wurde die Filterdicke bis zur halben Gitterkonstante variiert ( $0,16 \leq t/g \leq 0,48$ ) (s. Abb. 17 und 18). Das erste Hauptmaximum wird mit zunehmender Filterdicke schmaler. Die Steigung der Flanke des Hauptmaximums und das Sperrverhalten des Filters zu niedrigeren Frequenzen nimmt mit der Filterdicke zu. Die Lage des Hauptmaximums ist von der Filterdicke nahezu unabhängig. Mit zunehmender Filterdicke nähert sich das zweite Maximum dem Hauptmaximum, und die Halbwertsbreite des zweiten Maximums nimmt zu.

### Übersicht

Die in diesem Kapitel diskutierten Ergebnisse aus experimentellen und theoretischen Untersuchungen an Bandpaßfiltern /8-10,13/ sind in Tab. 3 nochmals zusammengefaßt. Da der Erzeugung schmaler Schlitzaperturen herstellungsbedingt Grenzen gesetzt sind /z. B. 8/, muß die Filterdicke erhöht werden, um das Sperrverhalten und die Trennschärfe der Bandpaßfilter zu erhöhen.

<b>Geometrieänderung</b>	<b>Filtercharakteristik /8-11/</b>
Verringerung der Schlitzbreite bei gleicher Gitterkonstante	bessere Trennschärfe, geringe Verschiebung des Hauptmaximums zu niedrigeren Frequenzen
Vergrößerung der Schlitzlänge bei gleicher Gitterkonstante	bessere Trennschärfe, Verschiebung des Hauptmaximums zu niedrigeren Frequenzen
Verkleinerung der Schlitzlänge und der Gitterkonstante bei konstantem Verhältnis Schlitzlänge zu Gitterkonstante	Verschiebung des gesamten Paßbands zu niedrigeren Frequenzen
Erhöhung der Filterdicke	wesentlich bessere Trennschärfe, Filterdicke praktisch ohne Einfluß auf die Lage des Hauptmaximums

Tab. 3: Übersicht über die in diesem Kapitel diskutierten Einflüsse der Geometrievariation auf die Trennschärfe und auf die Lage des Hauptmaximums von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen

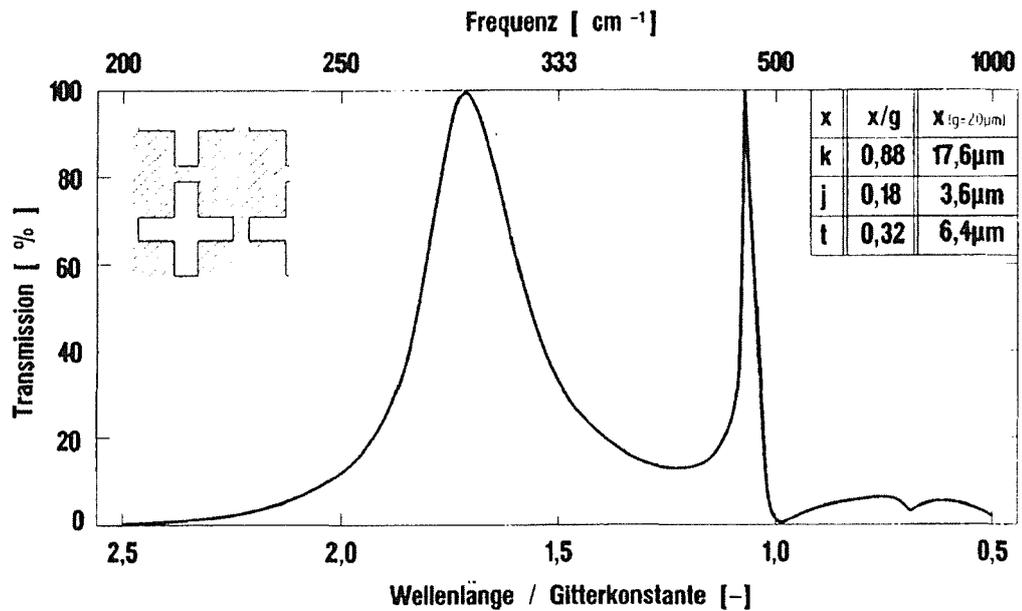


Abb. 17: Berechnete Transmissionskurve eines Filters mit  $t/g=0,32$  mit schmalen Kreuzschlitzaperturen ( $j/k=0,20$ ) nach Compton et al. /11/. Das Hauptmaximum liegt bei  $\lambda/g = 1,68$ , das zweite Maximum bei  $\lambda/g = 1,06$ .

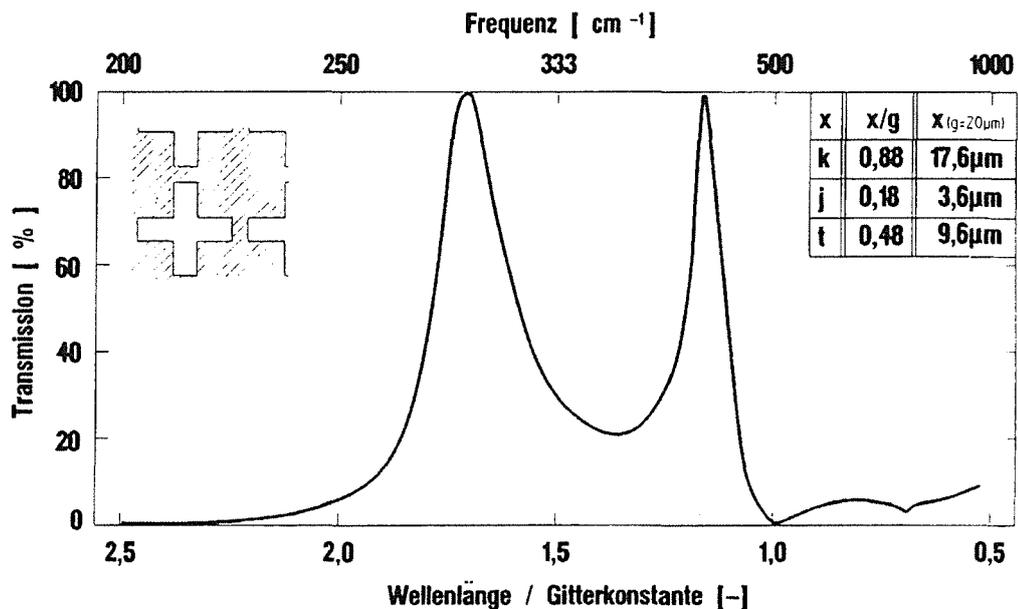


Abb. 18: Berechnete Transmissionskurve eines Filters mit  $t/g=0,48$  mit schmalen Kreuzschlitzaperturen ( $j/k=0,20$ ) nach Compton et al. /11/. Die Lage des Hauptmaximums wurde bei  $\lambda/g=1,67$  errechnet, das zweite Maximum näherte sich merklich dem ersten ( $\lambda/g = 1,13$ ).

## 2.4 Bandsperrfilter mit Tripolstrukturen

Bei der Herstellung von frequenzselektiven Oberflächen wurden neben gekreuzten Dipolstrukturen auch andere /13, 28/, wie z. B. sogenannte Tripole erzeugt, um die Filtercharakteristik zu variieren. Tripolstrukturen können als eine Anordnung von drei Dipolstrukturen beschrieben werden, die sich an einem Dipolende berühren und einen Winkel von jeweils  $120^\circ$  einschließen.

Nach dem Prinzip von Babinet müßte die komplementäre Struktur - eine Metallmembran mit Tripolschlitzaperturen - einen Bandpaß erzeugen. Über experimentelle oder theoretische Ergebnisse an freitragenden Bandpaßfiltern mit Tripolschlitzaperturen konnte in der Literatur kein Hinweis gefunden werden.

Aus dem Jahr 1982 sind experimentelle Untersuchungen von Rhoads et al. /13/ bekannt, die sich mit frequenzselektiven Oberflächen mit Tripol- und gekreuzten Dipolstrukturen befaßten. Mit Hilfe eines Elektronenstrahlschreibers wurden diese Strukturen mit Breiten von ca.  $0,3 \mu\text{m}$  und Längen von 3 bis  $4,3 \mu\text{m}$  als Resiststrukturen erzeugt (s. Abb. 19). Sie wurden in eine  $0,14 \mu\text{m}$  dicke Aluminiumfolie geätzt, die von einem 1 mm dicken Calciumfluorid ( $\text{CaF}_2$ ) - Substrat getragen wurde.

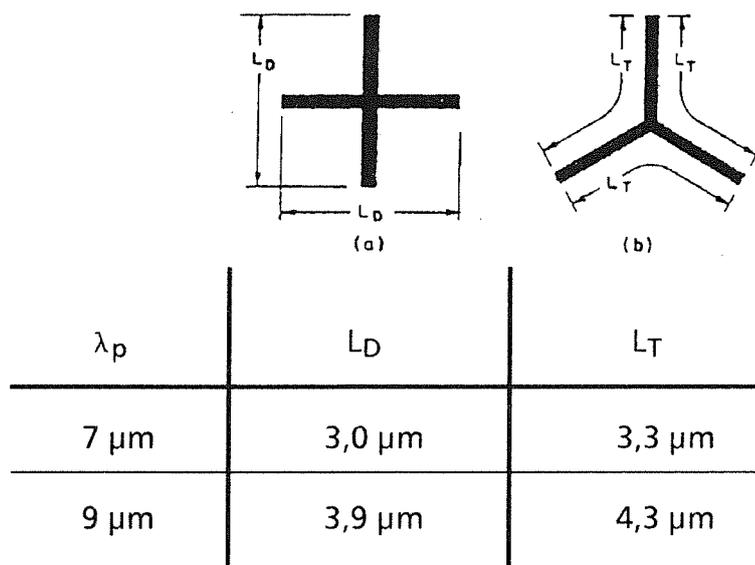


Abb. 19: Lage des Transmissionsmaximums  $\lambda_p$  und entsprechende charakteristische Maße und Geometrie von frequenzselektiven Oberflächen mit gekreuzten Dipolen (a) und Tripolen (b), die von Rhoads et al. durch Elektronenstrahlolithographie und Metallätzen hergestellt wurden /13/. Die Bandsperrfilter bestehen aus  $0,14 \mu\text{m}$  dicken Aluminiumstrukturen, die von einem 1 mm dicken  $\text{CaF}_2$ -Substrat getragen werden.

Beide Filtertypen zeigen, wie für frequenzselektive Oberflächen zu erwarten ist, das Transmissionsverhalten einer Bandsperrung. Sie besitzen bei hohen und niedrigen Frequenzen eine hohe Infrarottransmission. Dazwischen liegt der Bereich der Bandsperrung, in dem für die Wellenlänge  $\lambda_p = 7\ \mu\text{m}$  bzw.  $9\ \mu\text{m}$  eine minimale Transmission nahe null gemessen wurde (s. Abb. 20).

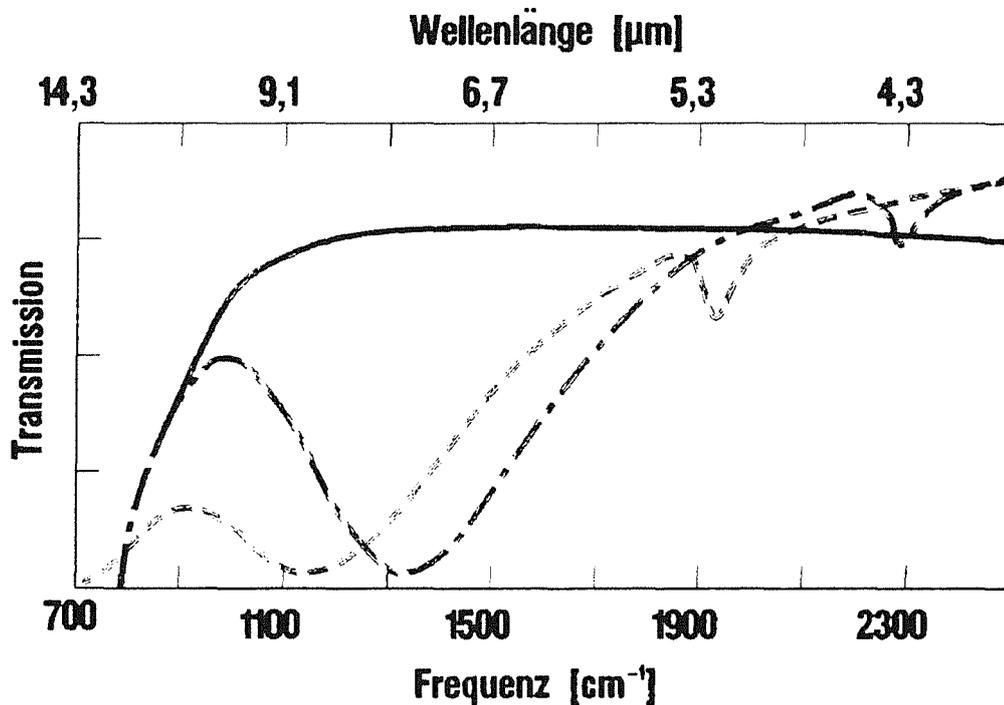


Abb. 20: Transmissionskurven von frequenzselektiven Oberflächen mit Tripolstrukturen aus der Veröffentlichung von Rhoads et al. /13/. Die Transmissionskurve einer Bandsperrung mit kurzen Tripolstrukturen mit dem Minimum bei  $1340\ \text{cm}^{-1}$  ist als strichpunktierte, die Kurve eines Sperrfilters mit langen Tripolen mit dem Minimum bei  $1140\ \text{cm}^{-1}$  als gestrichelte Linie eingezeichnet. Als Referenz ist die Infrarottransmission des 1 mm dicken  $\text{CaF}_2$ -Substrats als durchgezogene Linie angegeben.

Für gekreuzte Dipolstrukturen wurde das Transmissionsminimum bei der Wellenlänge gemessen, die ungefähr der doppelten Dipollänge  $L_D$  entspricht.

$$\lambda_p \approx 2 * L_D \quad (4)$$

Die Filter mit den Tripolstrukturen waren so konstruiert, daß sie bei der gleichen Wellenlänge wie die Filter mit gekreuzten Dipolstrukturen ihr Transmissionsminimum besitzen. Die Wellenlänge  $\lambda_p$  entspricht jedoch nicht ganz der doppel-

ten Tripollänge  $L_T$ , die Rhoads et al. über die Länge von zwei Schenkeln der Tripolstruktur definiert haben:

$$\lambda_p \approx 1,82 * L_T \quad (5)$$

Zusätzlich zum Minimum bei  $\lambda_p$  wurde ein weiteres, weniger stark ausgeprägtes Minimum mit 15 % Transmission bei höheren Frequenzen gemessen.

Nach dem Prinzip von Babinet ist damit für Bandpaßfilter mit Tripolschlitzaperturen ein Transmissionsmaximum bei Wellenlängen unterhalb der doppelten Tripollänge zu erwarten. Daneben sollte ein weiteres Transmissionsmaximum mit geringerer Intensität im Frequenzbereich oberhalb des Hauptmaximums gemessen werden können.

### 3 Herstellungsverfahren und Experimentelles

#### 3.1 Herstellung von Infrarotbandpaßfiltern nach dem LIGA - Verfahren

Für ISOPHOT (Erläuterung: siehe Anhang) sollen Bandpaßfilter für den Infrarotbereich mit einem guten Sperrverhalten für den niederfrequenten Spektralbereich und einer großen Steilheit der niederfrequenten Flanke zum Transmissionsmaximum (Trennschärfe) hergestellt werden. Diese Bandpaßfilter bestehen aus einer mikrostrukturierten Metallmembran definierter Dicke. Nach der Simulation von Compton et al. /11/ sollen die gewünschten Filtereigenschaften durch Variation der Filterdicke eingestellt werden können.

Zur Herstellung von Infrarotbandpaßfiltern mit Filterdicken von 2 bis 29  $\mu\text{m}$  wurde das LIGA-Verfahren eingesetzt. Das Wort LIGA ist eine Abkürzung für die bei diesem Verfahren eingesetzten Fertigungsschritte Röntgentiefen-Lithographie mit Synchrotronstrahlung, Mikro-Galvanoformung und Abformung<sup>16</sup> /1/. Mit diesem Verfahren werden Mikrostrukturen aus Metall oder Kunststoff hergestellt, deren minimale Lateralabmessungen bis in den Submikrometerbereich reichen. Die maximalen Strukturhöhen betragen gegenwärtig ca. 300  $\mu\text{m}$ . Die Mikrostrukturen zeichnen sich durch Planparallelität der Strukturwände und Fertigungstoleranzen im Submikrometerbereich aus /2/. Deshalb wurde bei der vorliegenden Arbeit das LIGA-Verfahren eingesetzt, um verschieden dicke Infrarotbandpaßfilter mit exakt definierten Schlitzaperturen herzustellen.

Das Prinzip des LIGA-Verfahrens ist in Abb. 21 dargestellt. Durch eine Maske aus einem für Röntgenstrahlung weitgehend durchlässigen Träger, der Strukturen aus einem stark röntgenabsorbierenden Material besitzt, wird ein strahlensensitiver Kunststoff (Resist) mit Synchrotronstrahlung strukturiert. Die bestrahlten Bereiche des Resists werden mit einem Entwickler gelöst. Dadurch wird eine Kunststoffform auf einer elektrisch leitenden Grundplatte (Substrat) erzeugt, von der aus die freien Zwischenräume der Resiststruktur galvanisch mit Metall aufgefüllt werden. Die so erzeugten metallischen Mikrostrukturen können in einer Einzelstückfertigung direkt als fertiges Bauteil von Substrat und Resist getrennt werden, dienen jedoch meist als Formeinsätze für die Herstellung sekundärer Kunststoffformen in Serienfertigung. Diese Abformteile können entweder bereits das poly-

---

<sup>16</sup> Dieses Verfahren wird am Institut für Mikrostrukturtechnik der Universität und des Kernforschungszentrums Karlsruhe entwickelt und dessen industrielle Nutzung gegenwärtig von der Fa. Steag MT, Karlsruhe, in Kooperation mit anderen deutschen Firmen vorbereitet.

mere Endprodukt der Fertigung darstellen oder in einem Massengalvanoformungsprozeß als Negativstrukturen für metallische Produkte eingesetzt werden.

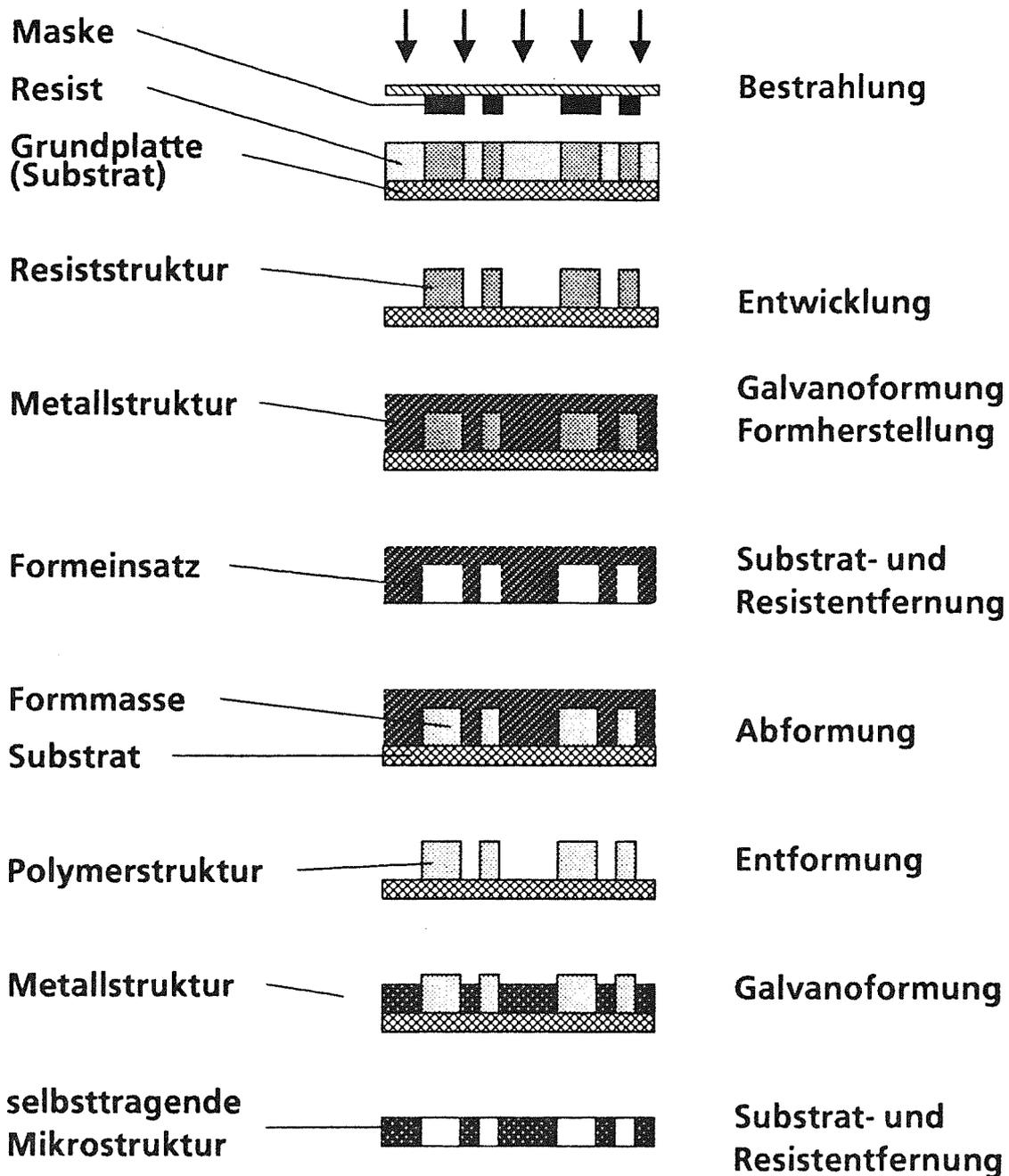


Abb. 21: Fertigungsschritte beim LIGA-Verfahren: Durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung wird eine Resiststruktur erzeugt, die galvanisch mit einem Metall aufgefüllt und zur Herstellung eines Formeinsatzes bewußt übergalvanisiert wird. Nach dem Entfernen des Substrats und der restlosen Entfernung des Resists (Strippen) wird die Metallstruktur zur Abformung von sekundären Polymerstrukturen eingesetzt. In einem anschließenden Massengalvanoformungsprozeß werden damit die metallischen Endprodukte hergestellt.

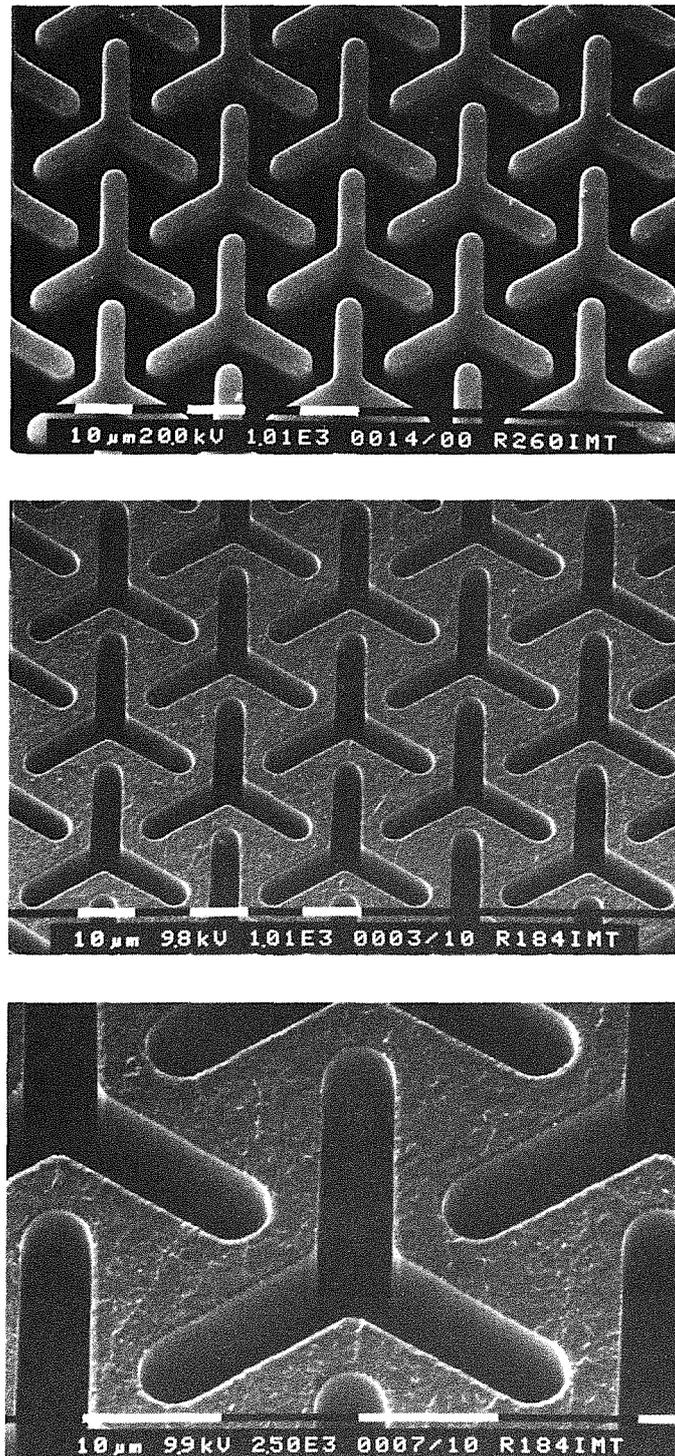


Abb. 22: Dokumentation der Fertigungsschritte eines Bandpaßfilters mit Tripolschlitzaperturen anhand von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Oben ist die 30  $\mu\text{m}$  hohe Resiststruktur zu sehen, eine Anordnung von Tripolstrukturen aus Kunststoff als Komplementärstruktur eines Filters (Vergr.: 1000-fach). In der Mitte (Vergr.: 1000-fach) und unten (2500-fach) ist das fertiggestellte Filter aus Kupfer mit den Tripolschlitzaperturen (5  $\mu\text{m}$  breit, 17  $\mu\text{m}$  lang) dargestellt. Zu erkennen sind die glatten, planparallelen Wände in den 20  $\mu\text{m}$  tiefen Schlitzaperturen.

Für ISOPHOT wurden Infrarotbandpaßfilter nur als Einzelstücke mit geringer Stückzahl benötigt (pro Filtertyp 8 Stück). Deshalb ist auf die Herstellung eines Formeinsatzes verzichtet worden. Alle Filterstrukturen wurden direkt durch Röntgentiefenlithographie und Mikrogalvanoformung hergestellt. Nach der Galvanoformung der Filterstruktur wird der Resist restlos entfernt und die fertige Mikrostruktur vom Substrat getrennt. Abb. 22 zeigt einen nach dem LIGA-Verfahren hergestellten Bandpaßfilter mit Tripolstrukturen in verschiedenen Fertigungsstadien.

### 3.2 Fertigungsvarianten bei der Filterherstellung

Die nach dem LIGA-Verfahren zu fertigenden Infrarotbandpaßfilter für ISOPHOT sollten freitragend auf einem Kupferring hergestellt werden (s. Abb. 23). Dieser Ring hat neben der Funktion des Trägers der durch die Schlitzaperturen perforierten Filtermembran auch die Aufgabe einer Blende. Für die Herstellung von Infrarotfiltern auf Blendenringen stehen je nach gewünschter Filterdicke zwei Herstellungsvarianten zur Verfügung. Sie unterscheiden sich im verwendeten Substrat, auf dem die Filterstrukturen galvanisch abgeschieden wurden.

Infrarotbandpaßfilter  
aus Kupfer auf einem  
Kupferblendenring

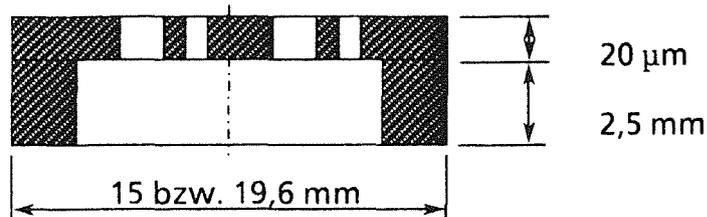


Abb. 23: Schematischer Querschnitt durch eine Filterstruktur mit Blendenring. Die nur 20 µm dicke Filterstruktur ist wesentlich stärker vergrößert gezeichnet als der im Original 2,5 mm dicke Blendenring.

#### 3.2.1 Herstellungsmethode für Filter mit Dicken oberhalb 5 µm

Bei der ersten Herstellungsvariante werden die Filterstrukturen auf einem Substrat hergestellt, das aus einem galvanisierten Kupferring besteht, der mit einem Titankern gefüllt ist (s. Abb. 24). Die Oberfläche des zusammengesetzten Substrats wird poliert, oxidiert [32] und mit Resist beschichtet. Durch Röntgentiefenlithographie erhält man auf der Titanoberfläche für die zu erzeugenden

Schlitzaperturen des Infrarotfilters eine Komplementärstruktur aus Resist. Durch die anschließende Galvanoformung wird - parallel mit der Abscheidung der Filterstruktur auf dem Titankern - der Kupferring um die Dicke der Filterstrukturen erhöht. Durch diese gleichzeitige galvanische Abscheidung werden die Filterstrukturen mit dem Blendenring aus Kupfer durch einen Stoffschluß verbunden. Nach dem Strippen des Resists wird der Titankern aufgelöst. Dadurch erhält man eine freitragende Filtermembran, die auf einem Blendenring aufgespannt ist.

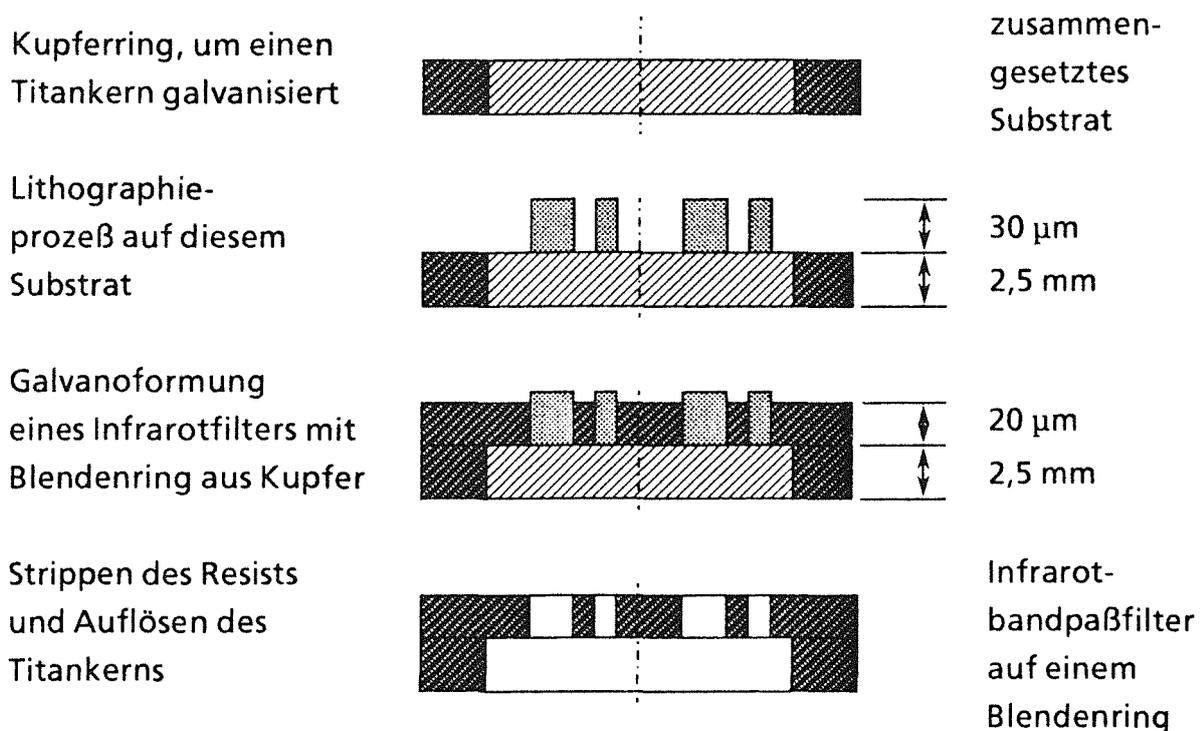
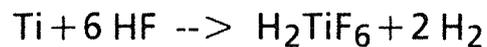


Abb. 24: Freitragende Filterstruktur auf einem Blendenring, hergestellt auf einem speziell für ISOPHOT ausgelegten Kupferingssubstrat mit Kern aus Titan. Nach der galvanischen Abscheidung eines Kupferlings um einen Titankern wird dieses zusammengesetzte Substrat mechanisch bearbeitet, oxidiert und mit Resist belackt. Durch Röntgentiefenlithographie werden z. B. 30 µm hohe Resiststrukturen erzeugt, die in der anschließenden Mikrogalvanoformung z. B. 20 µm dick mit Metall gefüllt werden. Dabei entsteht ein Stoffschluß zwischen dem Blendenring und der Filterstruktur. Nach dem Strippen des Resists und dem Auflösen des Titankerns ist der Bandpaßfilter freitragend auf einem Blendenring fertiggestellt.

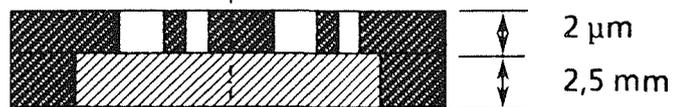
Bei diesem Vorgang hat sich Titan als Kernmaterial bewährt, da auf seiner oxidierten Oberfläche /32/ Resist und galvanisch abgeschiedenes Metall gut haften. Zudem läßt sich Titan in Flußsäure selektiv gegen Kupfer entfernen, ohne daß dabei die Kupferfilterstruktur angegriffen wird.

Beim Auflösen des Titankerns in einer Flußsäurelösung entsteht nach der Reaktionsgleichung Wasserstoff /40/:

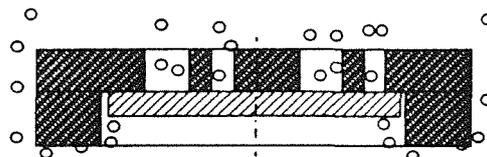


In der Ätzlösung bilden sich Wasserstoffblasen, die sich unter der Filterstruktur sammeln können. Durch Zugabe von Netzmittel wird die Oberflächenspannung der Flußsäurelösung herabgesetzt. Dadurch kann der Wasserstoff in ausreichendem Volumenstrom aus dem Spalt zwischen dem angeätzten Titankern und der freitragenden Filterstruktur durch die Schlitzaperturen entweichen. Bei Filterstrukturen, die dünner als  $5 \mu\text{m}$  sind, besteht jedoch die Gefahr, daß unter dem

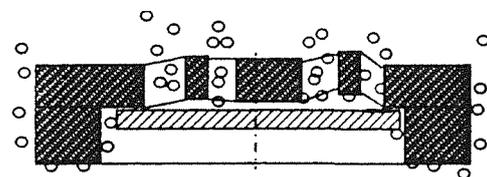
Galvanoformung einer Filterstruktur auf Titan-substrat mit Blendenring



Entfernen des Titankerns in einer Flußsäurelösung



Ausbeulen der Filterstruktur durch Ansammlung von Wasserstoffblasen zwischen Filterstruktur und Titankern



Zerstören der Filterstruktur durch zu hohen Gasdruck der Wasserstoffblasen

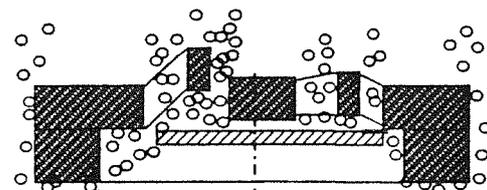


Abb. 25: Schematische Darstellung der Auswirkung der Wasserstoffblasenbildung: Während des Herauslösen des Titankerns aus dem Blendenring entsteht Wasserstoff. Er sammelt sich zwischen Filtermembran und Restsubstrat. Bei dünnen Filterstrukturen besteht die Gefahr, daß die Filterstruktur unter dem Gasdruck beult oder reißt.

Gasdruck, der sich allmählich während des Auflösens des Titankerns zwischen diesem und der Filterstruktur aufbaut, die Filterstrukturen beulen oder reißen (s. Abb. 25). Deshalb wird für dünne Filterstrukturen eine andere Herstellungsvariante des LIGA-Verfahrens durchgeführt. Das Verfahren wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 3.2.2 Herstellungsmethode auch für weniger als 5 µm dicke Filter

Bei diesem Verfahren wird der Blendenring auf eine durch Galvanoformung hergestellte Filterstruktur aufgeklebt, die sich auf einem mehrschichtigen Substrat befindet. Das Substrat besteht aus einem Siliziumwafer, auf den eine Graphit-Zwischenschicht und darüber eine Titanschicht gesputtert wird /33/.

Nach der naßchemischen Oxidation der Titanschicht /32/ werden auf diesem Substrat die Prozesse Lithographie und Galvanoformung durchgeführt. Nach dem Strippen des Resists wird ein Blendenring aus Kupfer auf die Filterstrukturen geklebt.<sup>17</sup> Die Titanschicht wird entlang dem äußeren Rand des Blendenrings durchtrennt. Anschließend wird der aufgeklebte Blendenring mit dem Schichtverbund - Kupferfilterstruktur auf einer Titanfolie - vom Wafer abgehoben. Durch die beim Sputterprozeß eingestellten inneren Zugspannungen der Titanschicht und die äußere Biegebeanspruchung am Blendenring und/oder Wafer kommt es zu einer Scherspannung und Kerbspannung zwischen der Titanschicht und dem Siliziumwafer und damit zur Trennung in der Graphit-Zwischenschicht. Nach der Entfernung der Graphitreste und der Titanschicht liegt das Infrarotbandpaßfilter freitragend auf einem Blendenring vor.

Der Fertigungsablauf ist in Abb. 26 schematisch dargestellt.

---

<sup>17</sup> Kryotauglicher Kleber (für ISOPHOT qualifiziert): EPO-TEK H74F, Fa. Polytec

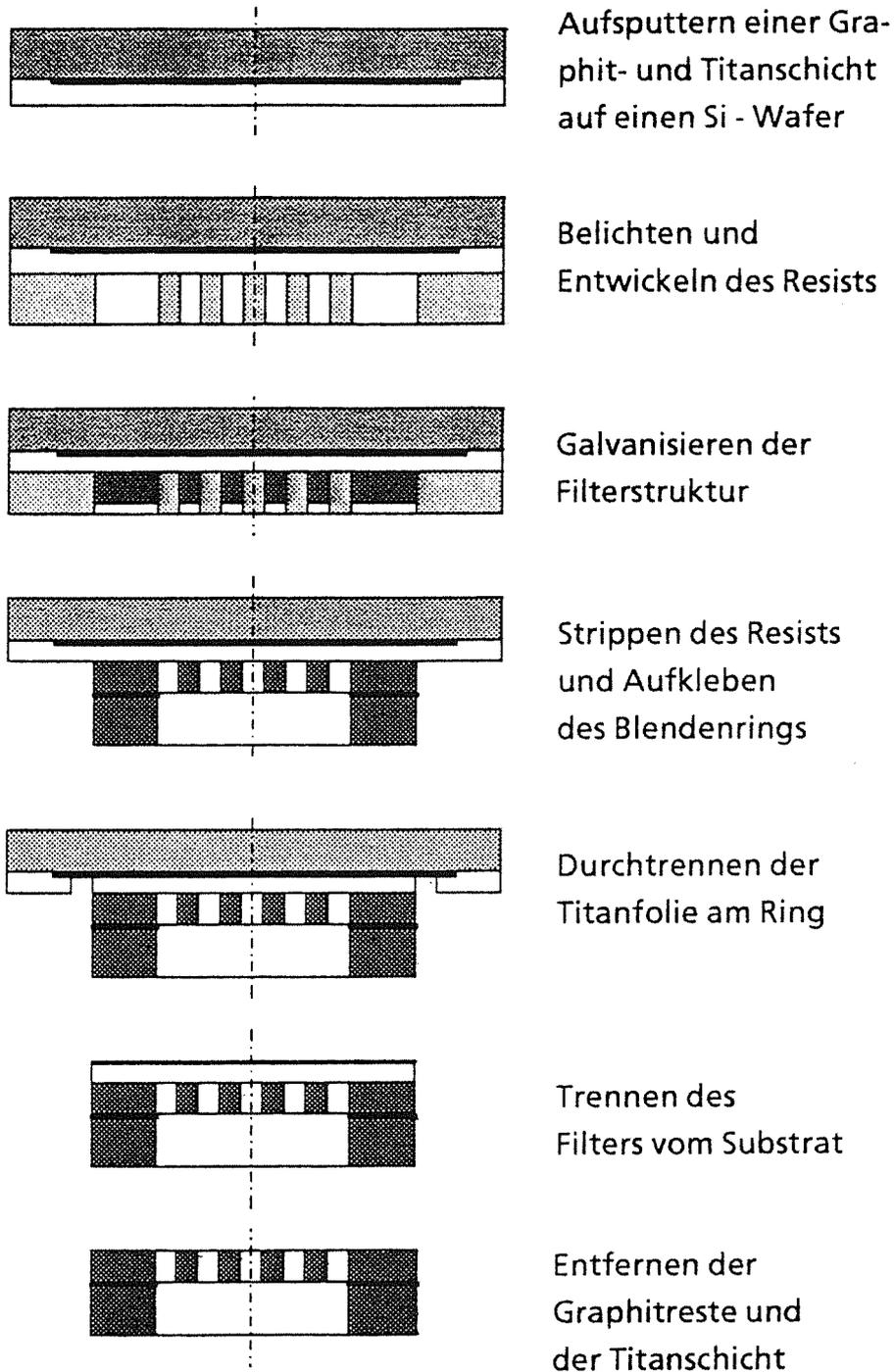


Abb. 26: Herstellung eines Bandpaßfilters auf einem Kupfer-Blendenring. Der Blendenring wird auf eine Filterstruktur aufgeklebt, die auf einem mehrschichtigen Substrat durch Galvanoformung erzeugt wurde. Die freitragende Filtermembran erhält man, nachdem der Resist gestrippt, das Substrat mechanisch von der Filterstruktur getrennt und die Titanschicht weggeätzt wurde.

### 3.3 Materialauswahl für die Galvanoformung von LIGA-Filtern

Bei beiden Herstellungsvarianten werden die Filterstrukturen und der Blendenring aus Elektrolytkupfer gefertigt. Damit ist gewährleistet, daß durch Abkühlen der Filterstrukturen auf 2 - 7 K während des Einsatzes in ISOPHOT /3/ keine Spannung durch unterschiedliche thermische Ausdehnung vom Blendenring auf die freitragende Filtermembran ausgeübt wird. Zur Galvanoformung wurde ein Kupferfluoroboratelektrolyt verwendet /36/. Zusätzlich zu den Infrarotfiltern aus Kupfer wurden im Rahmen der Untersuchungen auch Goldfilter aus einem sulfidischen Elektrolyten /35/ und Nickelfilter aus einem Sulfamatelektrolyten /34/ hergestellt.

### 3.4 Unterplattierung an LIGA-Filtern

Unabhängig vom verwendeten Elektrolyten wurde bei der Galvanoformung der Filterstrukturen aus Kupfer, Gold und Nickel häufig eine Metallabscheidung teilweise unter den Resiststrukturen festgestellt. Diesen Effekt nennt man Unterplattierung. Er wird dadurch verursacht, daß die Poren und Riefen der naßchemisch oxidierten Titanoberfläche /32/ unter den Resiststrukturen nicht vollständig mit Resist gefüllt werden. An solchen Stellen kommt es zur ungewünschten galvanischen Metallabscheidung im Randbereich unter den Resiststrukturen. Dadurch entsteht ein feiner metallischer Saum von einigen 100 nm Breite am Rand der Schlitzaperturen, der in diese hineinragt (s. Abb. 27).

Der Einfluß der Unterplattierung auf die Transmissionseigenschaften von Infrarotbandpaßfiltern wird in Kap. 4 behandelt.

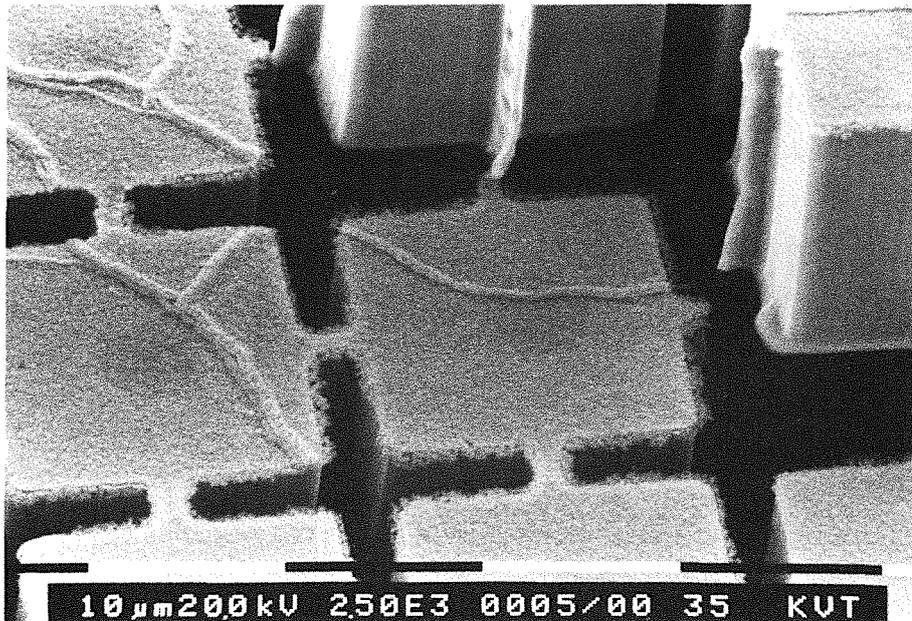


Abb. 27: Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt die dem - hier schon entfernten - Substrat zugewandte Oberfläche eines LIGA-Filters aus Kupfer. An den Kanten zu den Schlitzaperturen ist ein feiner Metallsaum zu sehen, der in die Schlitzaperturen hineinragt. Diesen bezeichnet man als Unterplattierung. Er wird durch die galvanische Abscheidung von Metall zwischen Resist und Substrat verursacht. Um die Unterplattierung an den Kanten zu den planparallelen Wänden der Schlitzaperturen besser sehen zu können, wurde die Filterstruktur entlang der metallischen Verbindungsstege zwischen den Schlitzaperturen aufgebrochen. Die aderartigen Strukturen auf der gezeigten Oberfläche des Bandpaßfilters rühren von der Rauheit des Substrats (ca. 1 µm) her.

#### 3.4.1 Vermeidung der Unterplattierung durch selektiv ätzbare Zwischenschichten

Zur Vermeidung der Unterplattierung wird vor der Galvanoformung der Filterstruktur galvanisch eine Zwischenschicht zwischen den Resiststrukturen mindestens in der Schichtdicke abgeschieden, die den Bereich erfäßt, in dem Unterplattierung zu erwarten ist (s. Abb. 28 und 29). Nach Galvanoformung und Lösen der Filterstruktur vom Substrat wird diese Zwischenschicht mit der Unterplattierung selektiv gegen das Filtermaterial weggelöst.

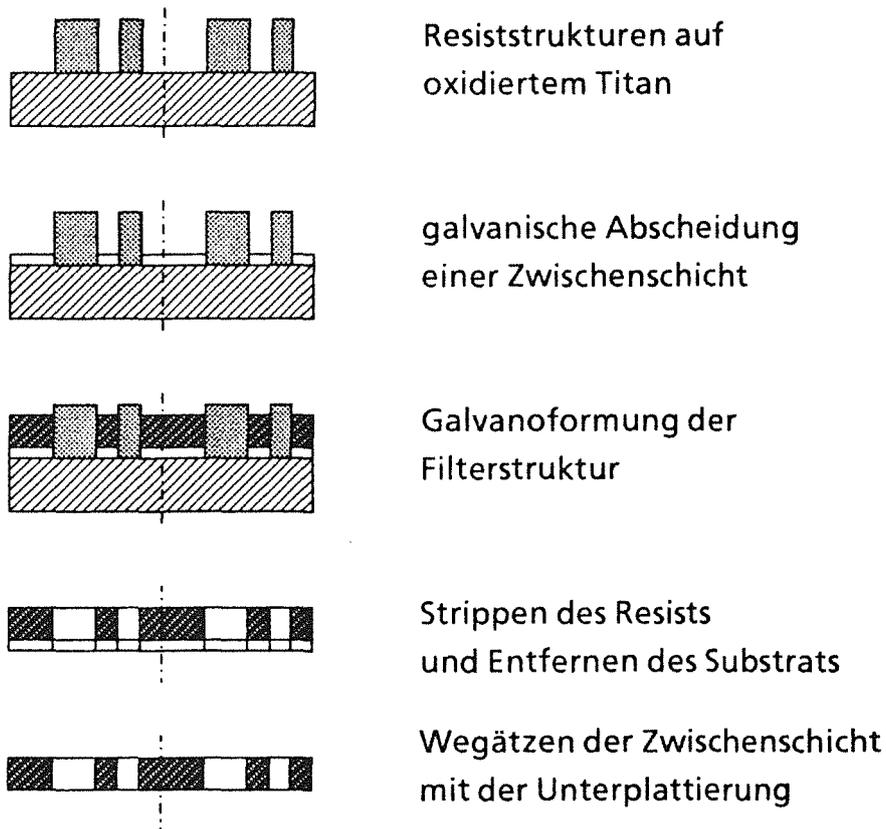


Abb. 28: Schematischer Prozeßablauf, um Infrarotfilter ohne Unterplattierung herzustellen. Im Bereich, in dem Unterplattierung zu erwarten ist (einige 100 nm), wird vor der Galvanoformung des Filters eine Zwischenschicht abgeschieden. Diese Zwischenschicht wird nach dem Entfernen des Substrats und Strippen des Resists selektiv gegen das Filtermaterial mit der Unterplattierung weggelöst. Dieses Verfahren wurde bei beiden Herstellungsverfahren, d. h. unabhängig vom Substrat, eingesetzt.

Bei Filterstrukturen aus Gold wurden Zwischenschichten aus Nickel oder Kupfer sehr einfach in einer Salpetersäurelösung beseitigt. Auch an Filterstrukturen aus Nickel wurden Kupferzwischenschichten selektiv entfernt /37/. Für Filterstrukturen aus Kupfer konnte keine geeignete Zwischenschicht gefunden werden. Deshalb wurde an Filterstrukturen aus Kupfer die Unterplattierung nachträglich mittels Sputterätzen<sup>18</sup> beseitigt.

<sup>18</sup>

Unter dem Begriff Sputterätzen ist das Abspalten im gerichteten Hochfrequenzplasma in einer Inertgasatmosphäre zu verstehen.

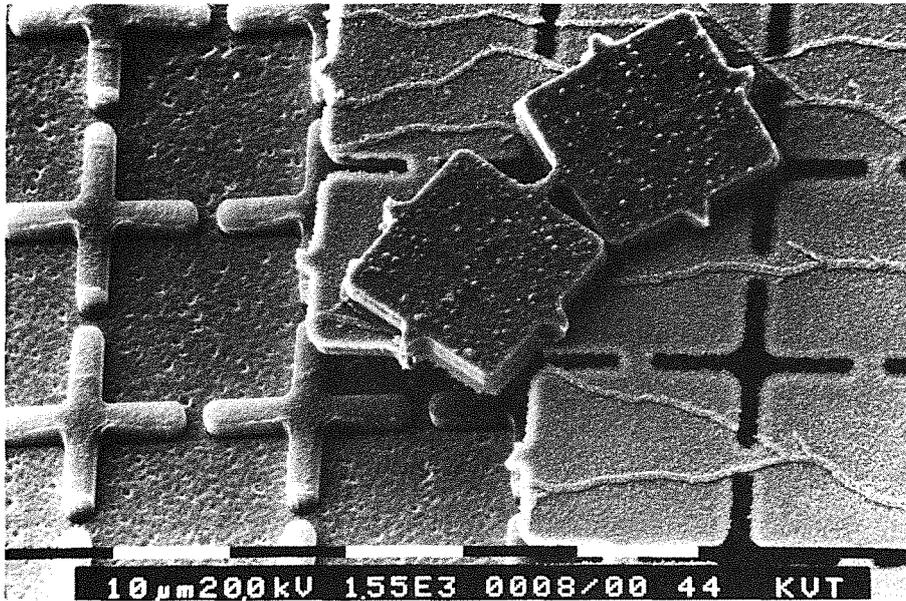


Abb. 29: Die Abbildung zeigt die Unterseite einer 20 µm dicken Filterstruktur aus Gold direkt nach dem Entfernen des Substrats. Die Kreuzschlitzaperturen sind hier noch mit Resist gefüllt. Über dem Goldfilter ist eine 1 µm dicke Nickelzwischenschicht zu sehen, die hier zur Veranschaulichung teilweise gelöst und umgeklappt wurde. Der Saum an der Nickelzwischenschicht entstand durch Unterplattierung. Durch das chemische Auflösen der Zwischenschicht wurde die Unterplattierung beseitigt.

### 3.4.2 Beseitigung der Unterplattierung durch Sputterätzen

Zur Beseitigung der Unterplattierung durch Sputterätzen werden die Filterstrukturen aus Kupfer nach dem Entfernen des Substrats auf der ursprünglich dem Substrat zugewandten Oberfläche in einem gerichteten Hochfrequenzplasma mit Argonionen bearbeitet. Die beschleunigten Argonionen treffen auf die Filteroberfläche und schlagen dort Kupferatome aus der Oberfläche. Es wird eine der Unterplattierung entsprechende Schicht von einigen zehn bis hundert Nanometern an den Filterstrukturen gleichmäßig abgetragen und damit die Unterplattierung beseitigt. Dieses Verfahren wurde auch an Filterstrukturen aus Gold und Nickel erfolgreich durchgeführt.

### 3.5 Fertigungskontrolle

Die Filterstrukturen wurden nach der Herstellung in einem Rasterelektronenmikroskop<sup>19</sup> begutachtet und die Gitterkonstanten und Schlitzaperturmaße mit Hilfe der dort eingebauten Linienbreitenmeßeinrichtung überprüft. Die Abweichung der erzeugten lateralen Geometrie von den Sollmaßen lag unterhalb von 30 nm, der Auflösungsgrenze des verwendeten Meßverfahrens.

Die Filterdicken wurden durch die Zeitdauer der galvanischen Abscheidung bei konstanter Stromdichte vorgegeben und mit Hilfe eines Schichtdickenmeßgerätes kontrolliert. Es wurden im Rahmen der Meßgenauigkeit von  $\pm 0,3 \mu\text{m}$  keine Maßabweichungen festgestellt.

Anschließend wurden Infrarottransmissionsmessungen an einem Fouriertransformations-Infrarotspektrometer<sup>9</sup> durchgeführt. Als Referenzprobe diente ein Blendenring ohne Filterstruktur. Vor und während jeder Messung wurde der Probenraum mit Luft gespült. Die Filter wurden senkrecht mit einer Winkelgenauigkeit von  $\pm 2^\circ$  durchstrahlt. Die Transmissionsmessungen erstreckten sich über einen Bereich von ca.  $100 \text{ cm}^{-1}$  bis  $1000 \text{ cm}^{-1}$ .

An LIGA-Filtern für ISOPHOT wurden unterschiedliche Tests durchgeführt<sup>20</sup>, um sie für das ISO-Projekt zu qualifizieren /38/. Die Infrarotbandpaßfilter wurden zweimal einem Zyklus unterworfen, bei dem sie auf 4,2 K abgekühlt Beschleunigungen von bis 25g ausgesetzt waren. Sie wurden senkrecht und parallel zur Filteroberfläche mit einem Hub von bis zu 20 mm geschüttelt. Weiterhin erfolgte eine spektrale Vermessung bei ca. 3 K. Diese Tests sollten die Bedingungen simulieren, denen die Infrarotfilter während des Starts und der geplanten 18-monatigen Arbeitszeit des ISO-Satelliten ausgesetzt sind. Vor und nach den Tests wurden die Filter über 3 Tage im Vakuum ( $p < 10^{-4}$  mbar) einer Temperatur von 350 K ausgesetzt, um den Evakuierungsvorgang der Experimentenkammer vor dem Start von ISO zu simulieren /39/.

An weiteren baugleichen LIGA-Filtern wurde zur Vorqualifikation 32-mal ein rein thermischer Zyklus durchgeführt: 293 K --> 4,2 K --> 293 K.

---

<sup>19</sup> Fa. Philips Typ: SEM 525 M

<sup>20</sup> Die Qualifikationstests der ISO-Filter wurden am Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, und an der Freien Universität Berlin, Fachbereich Physik (TTL/FUB) durchgeführt.

## 4. Darstellung der Ergebnisse

Mit dem LIGA-Verfahren wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Infrarotbandpaßfilter mit Kreuzschlitz- und Tripolschlitzaperturen hergestellt. Die Bandpaßfilter wurden durch Galvanoformung aus Kupfer, Gold und Nickel gefertigt, um den Einfluß des Materials auf die Filtereigenschaften zu ermitteln. An Filtern mit Kreuzschlitzaperturen und an zwei verschiedenen Tripolschlitzaperturen wurde eine Schichtdickenvariation durchgeführt und der Einfluß der Filterdicke sowohl auf die Infrarottransmission als auch auf die Trennschärfe der Bandpässe untersucht. Als Untersuchungsmethode diente die Infrarotspektroskopie im Bereich von ca.  $100\text{ cm}^{-1}$  bis  $1000\text{ cm}^{-1}$ .

### 4.1 Meßergebnisse an Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen

An unterschiedlich dicken LIGA-Filtern mit Kreuzschlitzaperturen gleicher lateraler Geometrie wurde die Infrarottransmission gemessen (Gitterkonstante  $g=20\text{ }\mu\text{m}$ , Schlitzlänge  $k=18,5\text{ }\mu\text{m}$ , Schlitzbreite  $j=3\text{ }\mu\text{m}$ ). Die Filterdicke  $t$  wurde zwischen  $2$  und  $29\text{ }\mu\text{m}$  variiert.

#### 4.1.1 Einfluß der Dicke von Filtern aus Kupfer auf ihre Transmissionscharakteristik

Die Transmissionskurve eines  $11\text{ }\mu\text{m}$  dicken LIGA-Filters als Funktion der Frequenz ist in Abb. 30 oben dargestellt. Im Paßband zwischen  $200$  und  $500\text{ cm}^{-1}$  sind zwei deutliche Maxima zu erkennen. Beide besitzen annähernd gleich hohe Transmissionswerte. Ein drittes Maximum besitzt nur ca. 4% Transmission. Die Maxima im einzelnen:

1. Maximum bei  $287\text{ cm}^{-1}$  mit 64 % Transmission,
2. Maximum bei  $409\text{ cm}^{-1}$  mit 63 % Transmission,
3. Maximum bei  $498\text{ cm}^{-1}$  mit 4 % Transmission.

In Abb. 30 unten ist die Transmissionskurve einer  $20\text{ }\mu\text{m}$  dicken Filterstruktur zu sehen. Die Transmissionskurve zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die in Abb. 30 oben. Für den dickeren Filter wurden vier Maxima gemessen:

1. Maximum bei  $287\text{ cm}^{-1}$  mit 61 % Transmission,
2. Maximum bei  $355\text{ cm}^{-1}$  mit 66 % Transmission,

3. Maximum bei  $470\text{ cm}^{-1}$  mit 10 % Transmission,
4. Maximum bei  $489\text{ cm}^{-1}$  mit 4 % Transmission.

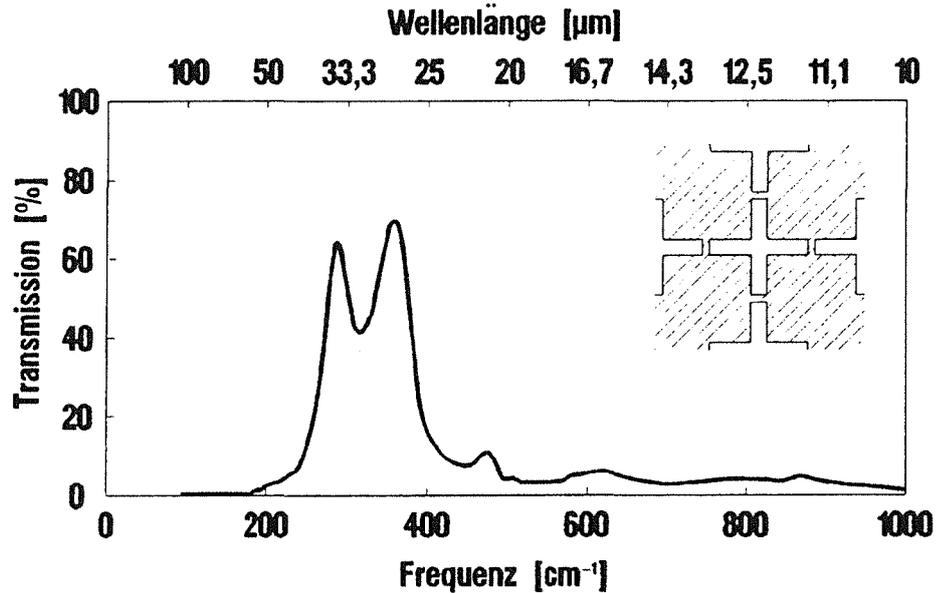
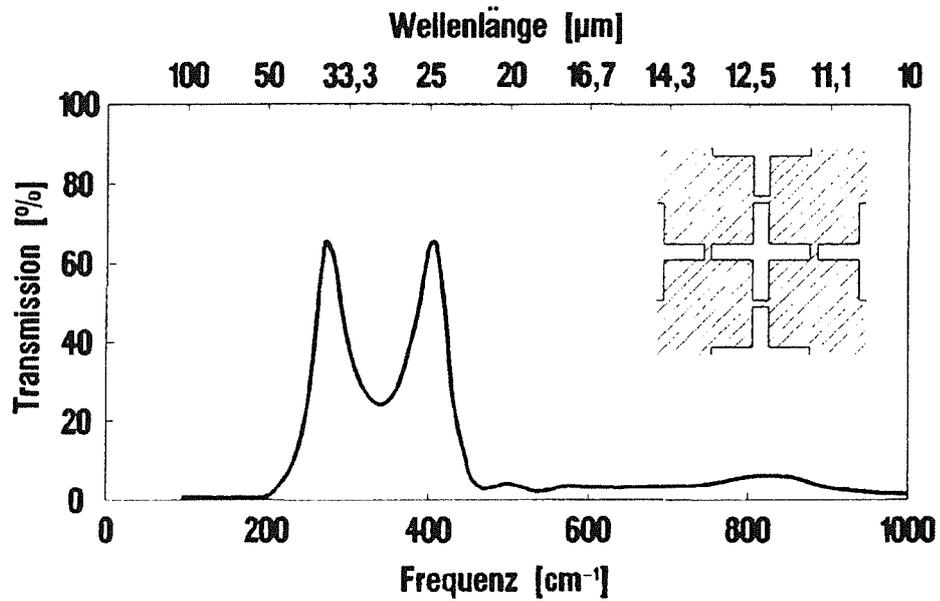


Abb. 30: Transmissionskurven zwischen  $100$  und  $1000\ \text{cm}^{-1}$  von Bandpaßfiltern aus Kupfer mit Kreuzschlitzaperturen. Die Filterdicke beträgt  $11\ \mu\text{m}$  (oben) und  $20\ \mu\text{m}$  (unten). Beide Transmissionskurven zeigen zwei deutliche Maxima im Paßband. Das Hauptmaximum ist nahezu unabhängig von der Filterdicke, die weiteren Maxima nähern sich mit zunehmender Filterdicke dem ersten Maximum.

Für das Filter mit der Dicke von  $29\ \mu\text{m}$  erhält man eine Transmissionskurve mit einem Doppelmaximum (Abb. 31), dem drei weitere Maxima folgen:

1. Maximum bei  $290\ \text{cm}^{-1}$  mit 57 % Transmission,
2. Maximum bei  $318\ \text{cm}^{-1}$  mit 65 % Transmission,
3. Maximum bei  $409\ \text{cm}^{-1}$  mit 57 % Transmission,
4. Maximum bei  $480\ \text{cm}^{-1}$  mit 7 % Transmission,
5. Maximum bei  $499\ \text{cm}^{-1}$  mit 4 % Transmission.

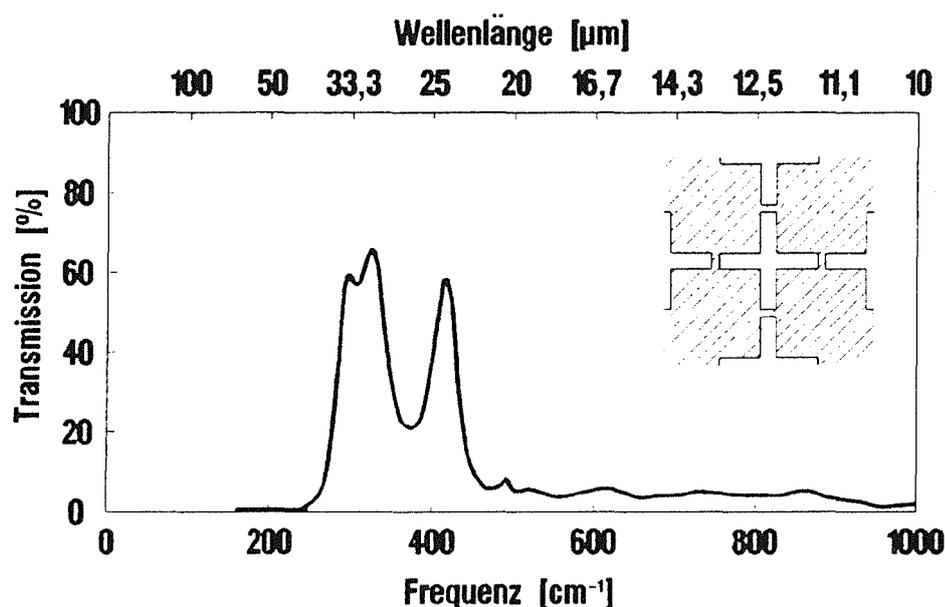


Abb. 31: Transmissionskurven zwischen  $100$  und  $1000\ \text{cm}^{-1}$  von Bandpaßfiltern aus Kupfer mit Kreuzschlitzaperturen. Die Filterdicke beträgt  $29\ \mu\text{m}$ . Die Transmissionskurve zeigt nach dem Doppelmaximum drei weitere Maxima im Paßband.

Um den Einfluß der Filterdicke auf die Lage der Transmissionsmaxima zu verdeutlichen, wurden in Abb. 32 die Positionen der einzelnen Maxima über der Filterdicke aufgetragen. Das erste Maximum ist nahezu unabhängig von der Filterdicke. Es liegt im Mittel bei  $289\ \text{cm}^{-1}$ , für dünne Filter um wenige Wellenzahlen darunter, für dickere etwas darüber. Die Frequenz  $\nu = 289\ \text{cm}^{-1}$  entspricht einer Wellenlänge von  $35\ \mu\text{m}$ . Der Wert der Wellenlänge des Hauptmaximums liegt etwas unterhalb der doppelten Schlitzlänge der Kreuzschlitze.

Betrachtet man die Lage der dem Hauptmaximum folgenden Maxima, so wird deutlich, daß mit zunehmender Filterdicke sich die Maxima dem ersten Maximum nähern und weitere von höheren Frequenzen her auftreten. Die zunehmende Annäherung führt zu einer Überlagerung der ersten beiden Maxima (s. Abb. 31).

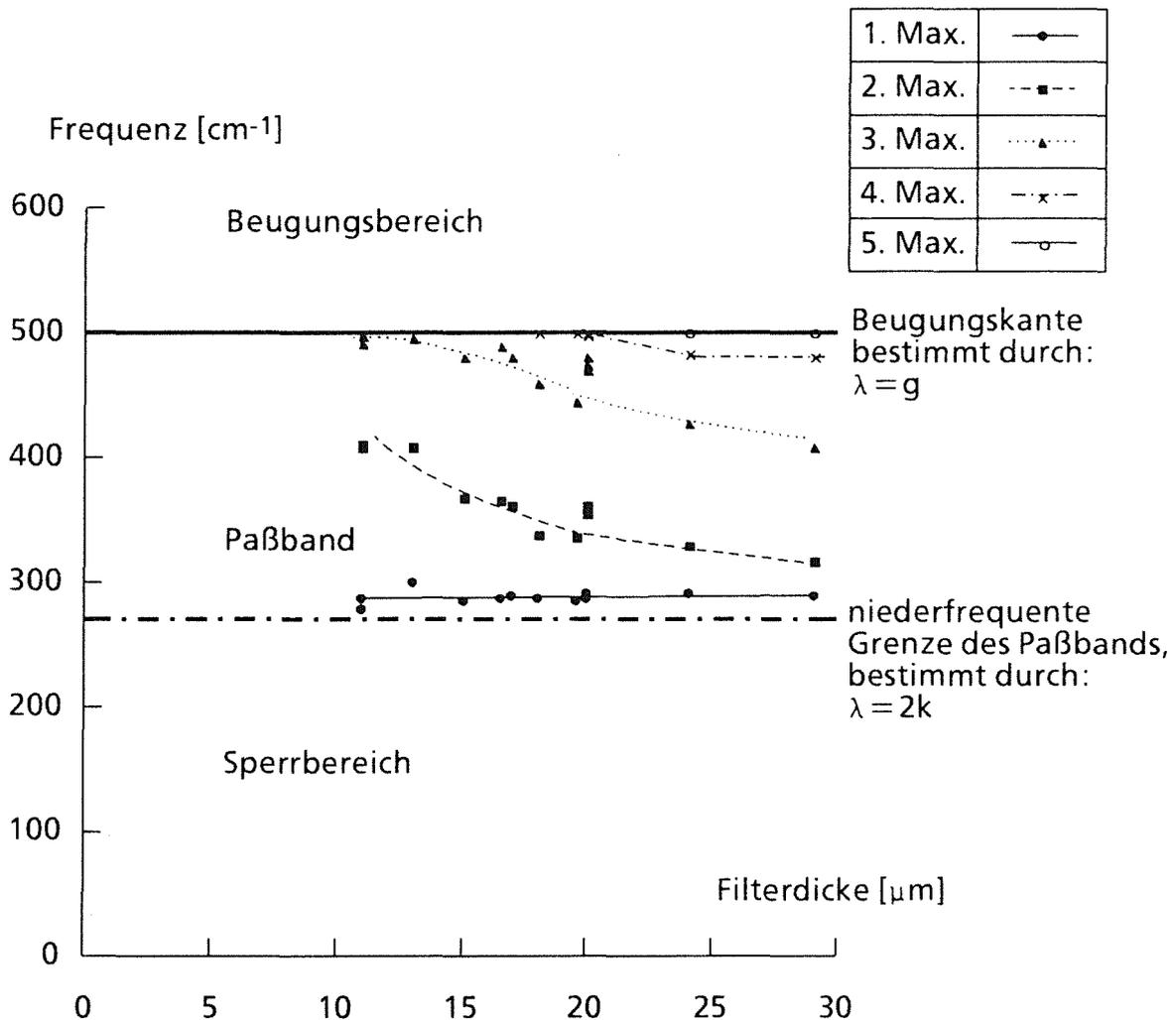


Abb. 32: Einfluß der Filterdicke auf die Lage der Transmissionsmaxima für Filter aus Kupfer mit Kreuzschlitzaperturen. Alle Maxima wurden zwischen den beiden gekennzeichneten Grenzfrequenzen  $270 \text{ cm}^{-1}$  und  $500 \text{ cm}^{-1}$  im Paßband gemessen.

Alle Maxima wurden im Paßband gemessen, das durch die Grenzfrequenzen  $270 \text{ cm}^{-1}$  ( $\lambda = 37 \mu\text{m}$ ) und  $500 \text{ cm}^{-1}$  ( $20 \mu\text{m}$ ) begrenzt wird. Die Werte der Grenzwellenlängen, die das Paßband bestimmen, entsprechen der lateralen Geometrie der Kreuzschlitze (doppelte Schlitzlänge  $2k = 37 \mu\text{m}$  und Gitterkonstante  $g = 20 \mu\text{m}$ ). Dem Paßband schließt sich im niederfrequenten Spektralbereich der Sperrbereich, im hochfrequenten der Beugungsbereich an. Für Frequenzen oberhalb der Beugungskante bei  $500 \text{ cm}^{-1}$  wird der einfallende Infrarotstrahl an der Filterstruktur gebeugt, da der Wert der Wellenlänge  $\lambda$  die Gitterkonstante  $g = 20 \mu\text{m}$  unterschreitet. Die Energie des einfallenden Strahls wird für Frequenzen oberhalb der Beugungskante in den Halbraum hinter dem Filter gebeugt und teilweise in der Filteroberfläche absorbiert. Im Beugungsbereich wurden Transmissionswerte

unter 10 % gemessen. Im Sperrbereich bei Frequenzen unter  $200 \text{ cm}^{-1}$  betrug die Transmission dicker Filter weniger als 1 %.

#### 4.1.2 Einfluß des Materials der Filter auf ihre Transmissionscharakteristik

Es wurden Filter aus Kupfer, Gold und Nickel mit Kreuzschlitzaperturen in der Filterdicke  $2 \text{ }\mu\text{m}$  bis  $29 \text{ }\mu\text{m}$  hergestellt. Abb. 33 zeigt die Lage der Transmissionsmaxima von Filtern aus den drei unterschiedlichen Materialien als Funktion der Filterdicke. Die Kurvenverläufe geben die Änderung der Lage der Maxima mit zunehmender Filterdicke wieder.

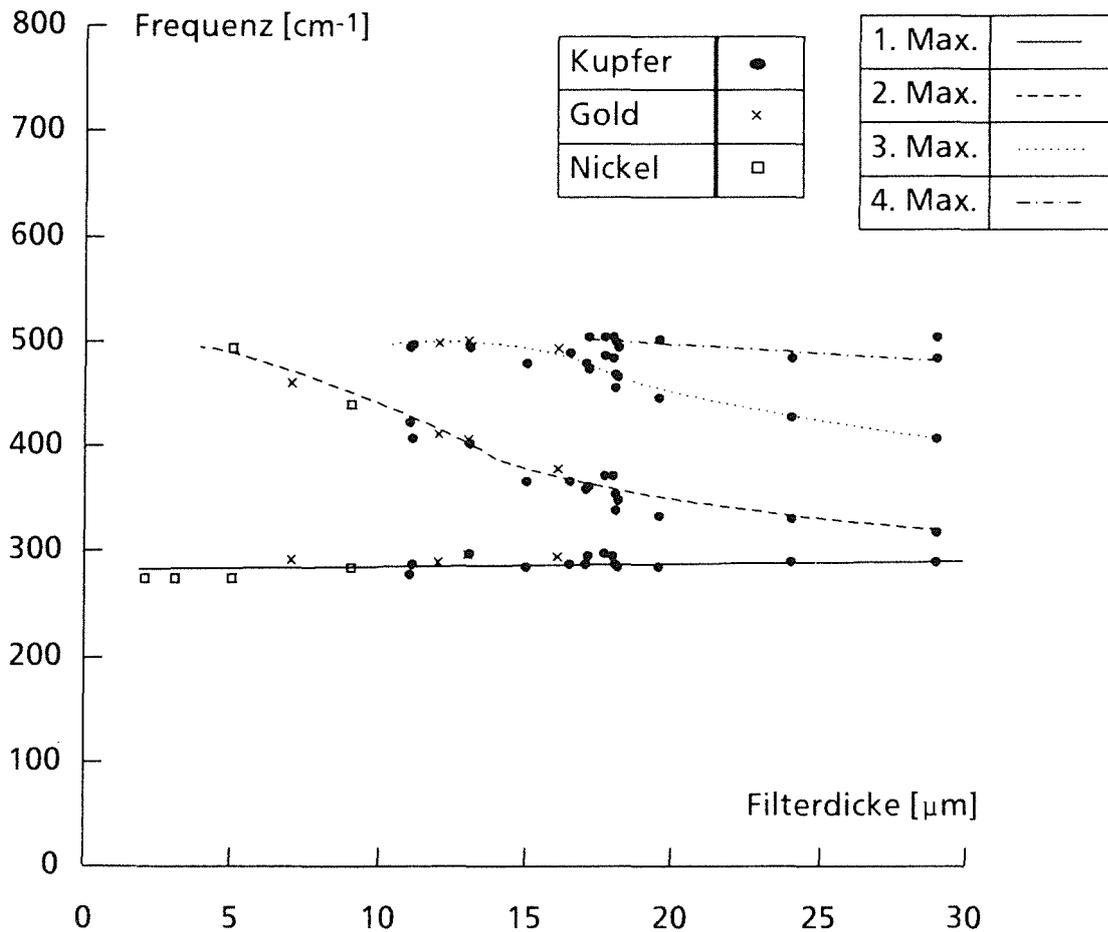


Abb. 33: Lage der Transmissionsmaxima als Funktion der Filterdicke von Filtern aus Kupfer, Gold und Nickel mit Kreuzschlitzaperturen. Es konnte kein Einfluß des Filtermaterials auf die Lage der Maxima festgestellt werden.

Die Meßwerte für Filter aus Gold und Nickel passen in die Kurvenverläufe der Kupferfilter (vgl. Abb. 32). Damit scheint kein Materialeinfluß auf die Transmissionscharakteristik vorhanden zu sein. Weiterhin konnte auch an den Transmissionswerten der einzelnen Maxima kein Einfluß des Filtermaterials festgestellt werden. Für Filter mit Kreuzschlitzaperturen aus Kupfer, Gold und Nickel wurden maximale IR-Transmissionen von 55 bis 80 % erzielt.

#### 4.1.3 Einfluß der Unterplattierung an Filtern auf ihre Transmissionscharakteristik

Für Filter mit nahezu gleicher Dicke und gleichem Material wurden teilweise unterschiedliche Transmissionswerte der Maxima gemessen. Die Unterschiede lassen sich durch die Unterplattierung (Kap. 3) erklären. Es wurde festgestellt, daß die Unterplattierung die maximalen Transmissionswerte beeinflußt. Die Unterplattierung tritt durch die unterschiedliche Rauheit der Substrate und dadurch bedingte Streuung der Haftung des Resists verschieden stark auf. Dadurch werden unterschiedliche Transmissionswerte gemessen.

Um den Einfluß der Unterplattierung zu belegen, wurde in einem gezielten Versuch eine 3 µm dicke Filterstruktur mit Kreuzschlitzaperturen aus Nickel mit bewußt starker Unterplattierung hergestellt. Die Filterstruktur zeigte ein Transmissionsmaximum bei 276 cm<sup>-1</sup> mit nur 4 %. Anschließend wurde an dieser Filterstruktur schrittweise die Unterplattierung durch Sputterätzen beseitigt (Kap. 3.4.2). Der Erfolg der Bearbeitung wurde durch Transmissionsmessungen nach jedem Bearbeitungsschritt kontrolliert.

Die Abtragsrate beim Sputterätzen von Nickel betrug bei 130 W Sputterleistung ca. 3 nm/min. (An Filtern aus Kupfer wurde eine Abtragsrate von ca. 10 nm/min, an Goldfilterstrukturen eine Abtragsrate von ca. 12 nm/min ermittelt.)

Nach abgeschlossener Bearbeitung hatte das Filter aus Nickel eine Dicke von nur noch 2 µm, da beim Beseitigen der Unterplattierung auch Material von der Filterstruktur abgearbeitet wird. Der Wert der Transmission bei 276 cm<sup>-1</sup> war von 4% auf 75 % angestiegen. Abb. 34 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Filterstruktur vor und nach der Beseitigung der Unterplattierung und einige Transmissionsmeßkurven als Kurvenschar, die den Bearbeitungserfolg dokumentieren. Die Meßkurve bestätigt, daß unterplattierungsfreie Bandpaßfilter einen hohen Kontrast besitzen.

Infrarotfilter aus Nickel  
mit gekreuzten Dipolen als Schlitzaperturen

Schlitzlänge: 18,5µm

Schlitzbreite: 3,0µm

Filterdicke: 2,0µm

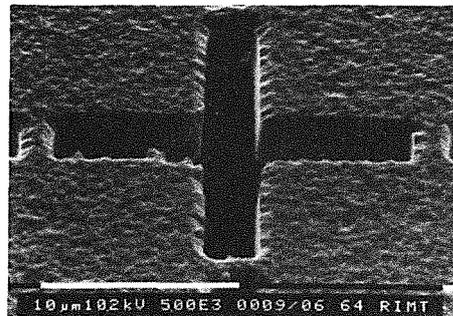
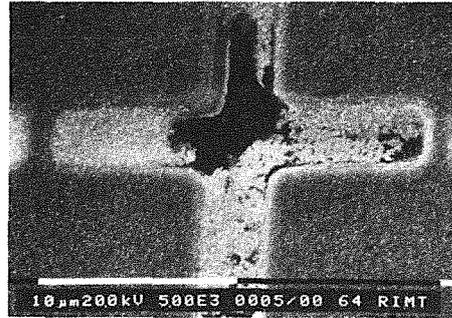
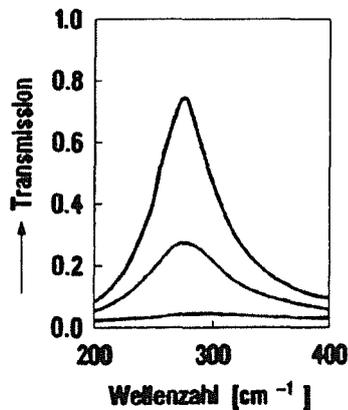


Abb. 34: Erhöhung der IR-Transmission einer Filterstruktur mit Kreuzschlitzaperturen durch Abtrag der unterplattierten Schicht. Die REM-Aufnahmen zeigen die Filterstruktur vor und nach der Bearbeitung im Argonplasma. Meßkurven dokumentieren die Ergebnisse der Transmissionsmessungen vor, während und nach der Bearbeitung.

#### 4.1.4 Einfluß der Filterdicke auf die Trennschärfe von Bandpaßfiltern

Neben einem hohen Kontrast sind weitere Forderungen an die Bandpaßfilter für ISOPHOT vor allem eine möglichst gute Trennschärfe und ein möglichst gutes Sperrverhalten. Als Trennschärfe in  $[\%/cm^{-1}]$  ist der Quotient aus der Steigung der niederfrequenten Flanke  $\Delta T/\Delta \nu$  und dem Transmissionswert des Hauptmaximums  $T(\nu_p)$  definiert. Um größere Streuungen der Werte für die Trennschärfe zu vermeiden, wurde die Steigung der niederfrequenten Flanke bei der Frequenz bestimmt, bei der die Infrarottransmission die Hälfte des Transmissionswerts des Hauptmaximums beträgt. Für die Filter mit Kreuzschlitzaperturen, deren Transmissionseigenschaften in Kap. 4.1.1 beschrieben sind, wurden folgende Werte für die Trennschärfe ermittelt:

Filter mit 11 µm Dicke: 3,4%/cm<sup>-1</sup>,

Filter mit 20 µm Dicke: 4,3%/cm<sup>-1</sup>,

Filter mit 29 µm Dicke: 5,4%/cm<sup>-1</sup>.

Abb. 35 zeigt die Trennschärfe von Filtern mit Kreuzschlitzaperturen als Funktion der Filterdicke. Wie die berechnete Ausgleichsgerade durch die ermittelten Werte

für die Trennschärfe zeigt, nimmt die Trennschärfe linear mit der Filterdicke zu. Damit wird für große Filterdicken die erwünschte hohe Trennschärfe der Bandpaßfilter erzielt. Diese Filter besitzen ebenfalls ein gutes Sperrverhalten.

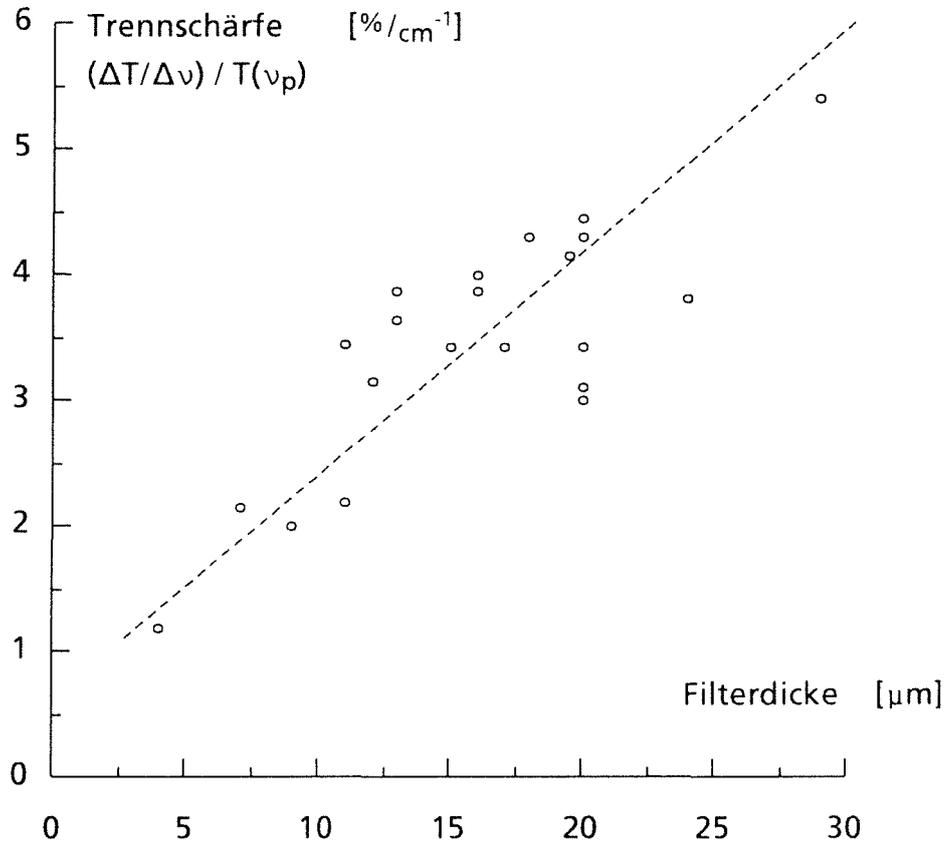


Abb. 35: Einfluß der Filterdicke auf die Trennschärfe von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen. Die Trennschärfe nimmt linear mit der Filterdicke zu.

Die Streuung der Zahlenwerte für die Trennschärfe wird durch die Streuung der Steigung der niederfrequenten Flanke bedingt. Diese wiederum ergibt sich durch die Schwankungen der Transmissionswerte der Maxima. Die Unterschiede in den Transmissionswerten wurden vermutlich durch die Unterplattierung oder durch verschiedene Stadien ihrer Beseitigung verursacht.

## 4.2 Meßergebnisse an Filtern mit Tripolschlitzaperturen

Es wurden zwei Arten von LIGA-Filtern mit Tripolschlitzaperturen hergestellt. Der Filtertyp 'KT' besitzt kleine Tripolschlitzaperturen mit einer Schlitzlänge (Tripolarmlänge)  $l/2 = 11,5 \mu\text{m}$ , einer Schlitzbreite  $j = 3 \mu\text{m}$  und einer Gitterkonstante  $g = 14,5 \mu\text{m}$ . Der zweite Filtertyp 'GT' hat Schlitze mit  $l/2 = 17 \mu\text{m}$ , eine Schlitzbreite  $j = 5 \mu\text{m}$  und eine Gitterkonstante  $g = 24,5 \mu\text{m}$ . Für beide Filtertypen wurde eine Filterdickenvariation durchgeführt.

### 4.2.1 Einfluß der Filterdicke auf die Transmissionscharakteristik von Filtern mit Tripolschlitzaperturen 'KT'

An Filtern mit Tripolschlitzaperturen 'KT' wurde eine Variation der Filterdicke von 2 bis  $19 \mu\text{m}$  durchgeführt.

Abb. 36 oben zeigt die Transmissionskurve eines  $2 \mu\text{m}$  dicken Filters. Die Kurve hat folgende Maxima:

1. Maximum bei  $275 \text{ cm}^{-1}$  mit fast 100 % Transmission,
2. Maximum bei  $760 \text{ cm}^{-1}$  mit 15% Transmission.

Bei  $470 \text{ cm}^{-1}$  wurde ein weiteres Maximum mit 30 % Transmission gemessen. Es liegt so nahe am breiten Hauptmaximum, daß es diesem zugeordnet wurde. Das zweite Maximum tritt in einem Spektralbereich auf, in dem eigentlich Beugung zu erwarten ist. Die Gitterkonstante, die die Beugungskante definiert, beträgt für das Filter 'KT'  $14,5 \mu\text{m}$ . Dies entspricht einer Frequenz von  $690 \text{ cm}^{-1}$ . Die Trennschärfe dieses Bandpaßfilters beträgt nur  $0,73 \text{ \%}/\text{cm}^{-1}$ .

Die Transmissionskurve eines  $10,5 \mu\text{m}$  dicken Filters 'KT' ist in Abb. 36 unten dargestellt. Sie weist drei Maxima auf:

1. Maximum bei  $262 \text{ cm}^{-1}$  mit 100 % Transmission,
2. Maximum bei  $472 \text{ cm}^{-1}$  mit 95 % Transmission,
3. Maximum bei ca.  $730 \text{ cm}^{-1}$ .

Dem zweiten Maximum wurden die beiden Nebenmaxima bei  $440$  und  $550 \text{ cm}^{-1}$  zugerechnet. Diese Nebenmaxima werden durch Transmissionseinbrüche bei  $450$  und  $520 \text{ cm}^{-1}$  verursacht.

Als Transmissionseinbruch wird ein Abfall der Infrarottransmission in der Art einer schmalen Absorptionsbande bezeichnet. Die Transmissionseinbrüche verursachen an Flanken zu Transmissionsmaxima jeweils ein relatives Minimum und Maximum, im Bereich eines Transmissionsminimums unerwartet niedrige Transmissions-

werte. Die Positionen der Transmissionseinbrüche erwiesen sich als unabhängig von der Filterdicke.

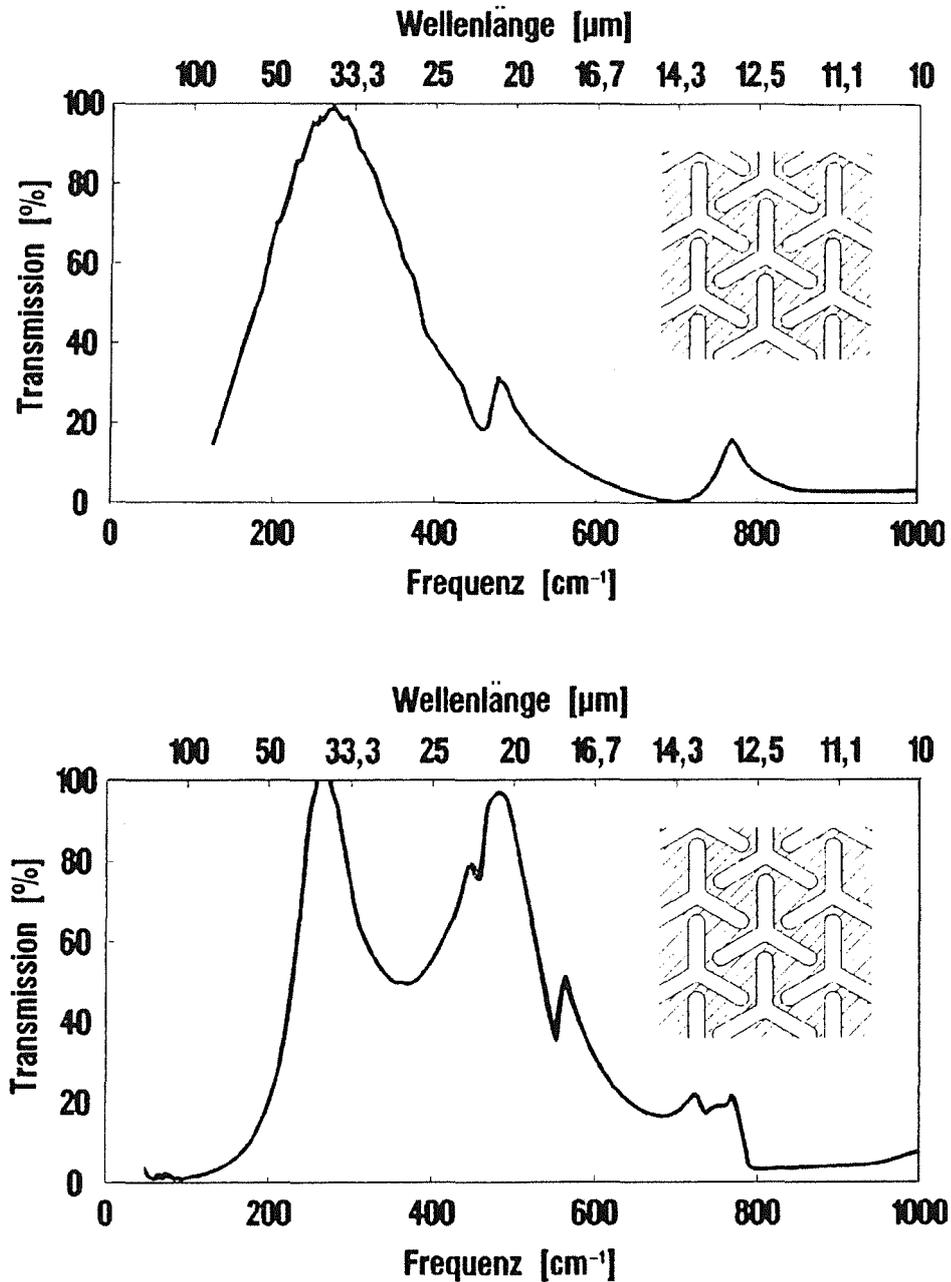


Abb. 36: Transmissionskurve eines 2 µm dicken Bandpaßfilters (oben) und eines 10,5 µm dicken Filters (unten) aus Kupfer mit Tripolschlitzaperturen 'KT' zwischen 100 cm<sup>-1</sup> und 1000 cm<sup>-1</sup>. Das Hauptmaximum wurde an beiden Filtern mit fast 100 % Transmission gemessen. Das 10,5 µm dicke Filter weist eine höhere Trennschärfe auf, da die Steigung der niederfrequenten Flanke zum Hauptmaximum größer ist als die des 2 µm dicken Filters.

An dem 10,5  $\mu\text{m}$  dicken Bandpaßfilter mit Tripolschlitzaperturen 'KT' wurden zwei weitere Maxima mit jeweils 20 % Transmission bei 710  $\text{cm}^{-1}$  bzw. 755  $\text{cm}^{-1}$  gemessen. Sie wurden als ein Maximum bei ca. 730  $\text{cm}^{-1}$  gewertet. Es wird von einem Transmissionseinbruch bei 740  $\text{cm}^{-1}$  geteilt und liegt bei einer Frequenz oberhalb der Beugungskante (690  $\text{cm}^{-1}$ ). Das Bandpaßfilter weist eine Trennschärfe von 1,75  $\%/ \text{cm}^{-1}$  auf.

An einem 14  $\mu\text{m}$  dicken Filter wurde eine Transmissionskurve (s. Abb. 37) mit folgenden drei Maxima gemessen:

1. Maximum bei 256  $\text{cm}^{-1}$  mit 83 % Transmission,
2. Maximum bei 409  $\text{cm}^{-1}$  mit 91 % Transmission,
3. Maximum bei 656  $\text{cm}^{-1}$  mit 68 % Transmission.

Ein weiteres Maximum bei 721  $\text{cm}^{-1}$  wurde als Nebenmaximum dem dritten Maximum zugerechnet, da es durch einen Transmissionseinbruch bei ca. 700  $\text{cm}^{-1}$  vom dritten abgetrennt wurde. Ein weiterer deutlicher Transmissionseinbruch wurde zwischen dem zweiten und dritten Maximum bei 520  $\text{cm}^{-1}$  festgestellt. Das 14  $\mu\text{m}$  dicke Filter besitzt eine Trennschärfe von 2,36  $\%/ \text{cm}^{-1}$ .

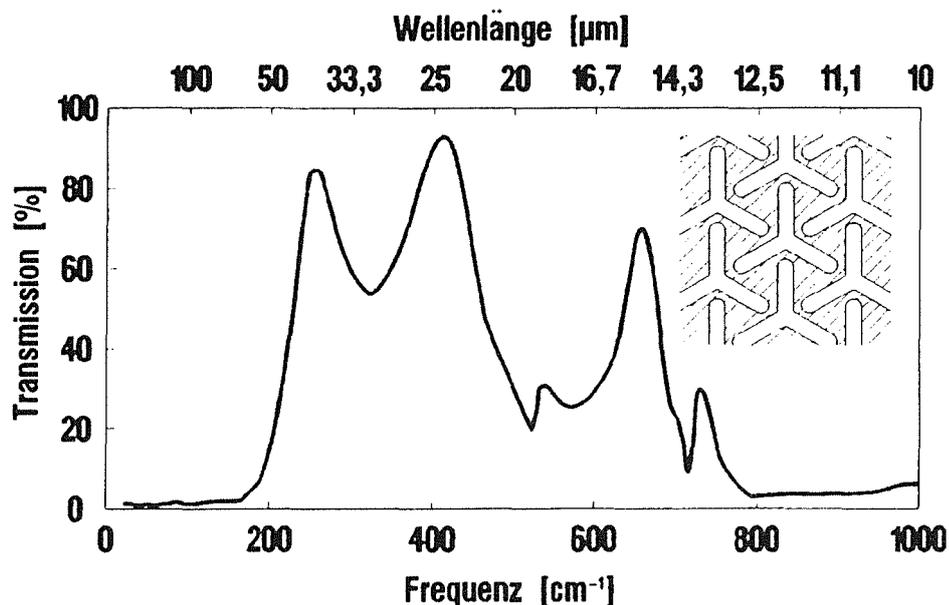


Abb. 37: Transmissionskurve eines 14  $\mu\text{m}$  dicken Filters aus Kupfer mit Tripolschlitzaperturen 'KT' zwischen 100 und 1000  $\text{cm}^{-1}$ . Das erste Maximum weist eine Transmission von 83%, das zweite Maximum einen Wert von 91% auf.

An einem 19  $\mu\text{m}$  dicken Bandpaßfilter (s. Abb. 38) wurden folgende vier Transmissionsmaxima gemessen:

1. Maximum bei  $256 \text{ cm}^{-1}$  mit 80 % Transmission,
2. Maximum bei  $330 \text{ cm}^{-1}$  mit 85 % Transmission,
3. Maximum bei  $498 \text{ cm}^{-1}$  mit 70 % Transmission,
4. Maximum bei  $667 \text{ cm}^{-1}$  mit 33 % Transmission.

An ihm wurde eine Trennschärfe von  $2,76 \text{ \%}/\text{cm}^{-1}$  ermittelt.

Ein weiteres Maximum bei  $742 \text{ cm}^{-1}$  wurde dem vierten Maximum zugerechnet. Zwischen dem vierten und dem ihm folgenden Maximum wurde ein Transmissionseinbruch bei  $690 \text{ cm}^{-1}$  bis  $720 \text{ cm}^{-1}$  festgestellt. Ein weiterer deutlicher Transmissionseinbruch wurde bei  $550 \text{ cm}^{-1}$  ermittelt, weitere Einbrüche wurden bei  $280 \text{ cm}^{-1}$  und  $450 \text{ cm}^{-1}$  vermutet, da die Transmissionskurve dort niedrige Transmissionswerte aufweist.

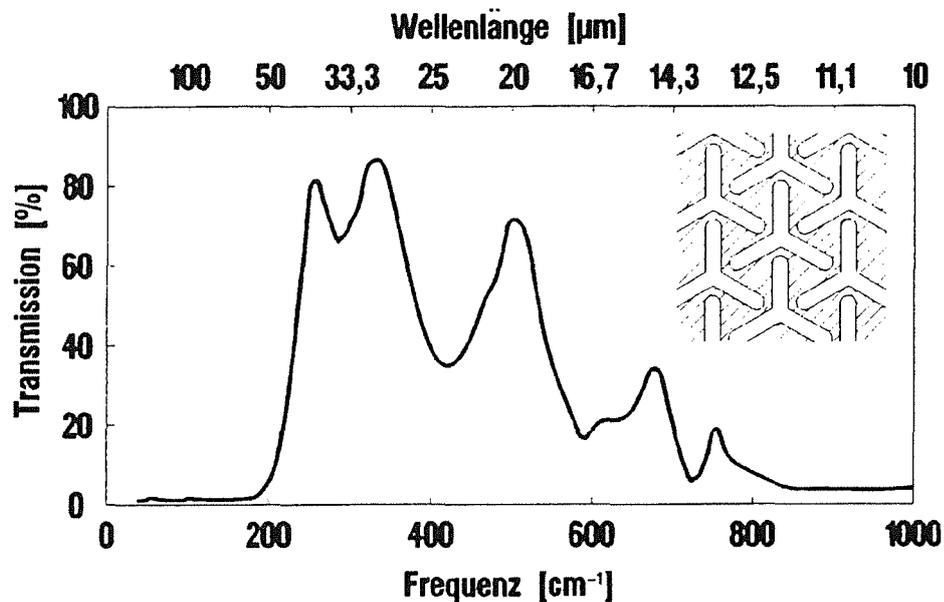


Abb. 38: Transmissionskurve eines  $19 \mu\text{m}$  dicken Filters aus Kupfer mit Tripolschlitzaperturen 'KT' zwischen  $100$  und  $1000 \text{ cm}^{-1}$ . Das erste Maximum wurde mit 80 %, das 2. mit 85 % Transmission gemessen.

Abb. 39 zeigt die Positionen der Transmissionsmaxima von Filtern mit Tripolschlitzaperturen 'KT' als Funktion der Filterdicke. In dieser Darstellung wird deutlich, daß die Position des Hauptmaximums nahezu unabhängig ist von der Filterdicke. Die mittlere Lage des Hauptmaximums wurde zu  $257 \text{ cm}^{-1}$  bestimmt. Für dieses Maximum wurden Transmissionswerte zwischen 80 und 100 % gemessen.

Mit zunehmender Filterdicke wurden zwei bis vier Transmissionsmaxima gemessen. Steigt die Filterdicke, so nähern sich diese Maxima dem Hauptmaximum. Häufig wurde das letzte Transmissionsmaximum zwischen  $690\text{ cm}^{-1}$  und  $780\text{ cm}^{-1}$  im erwarteten Beugungsgebiet oberhalb der Beugungskante ( $690\text{ cm}^{-1}$ ) gemessen.

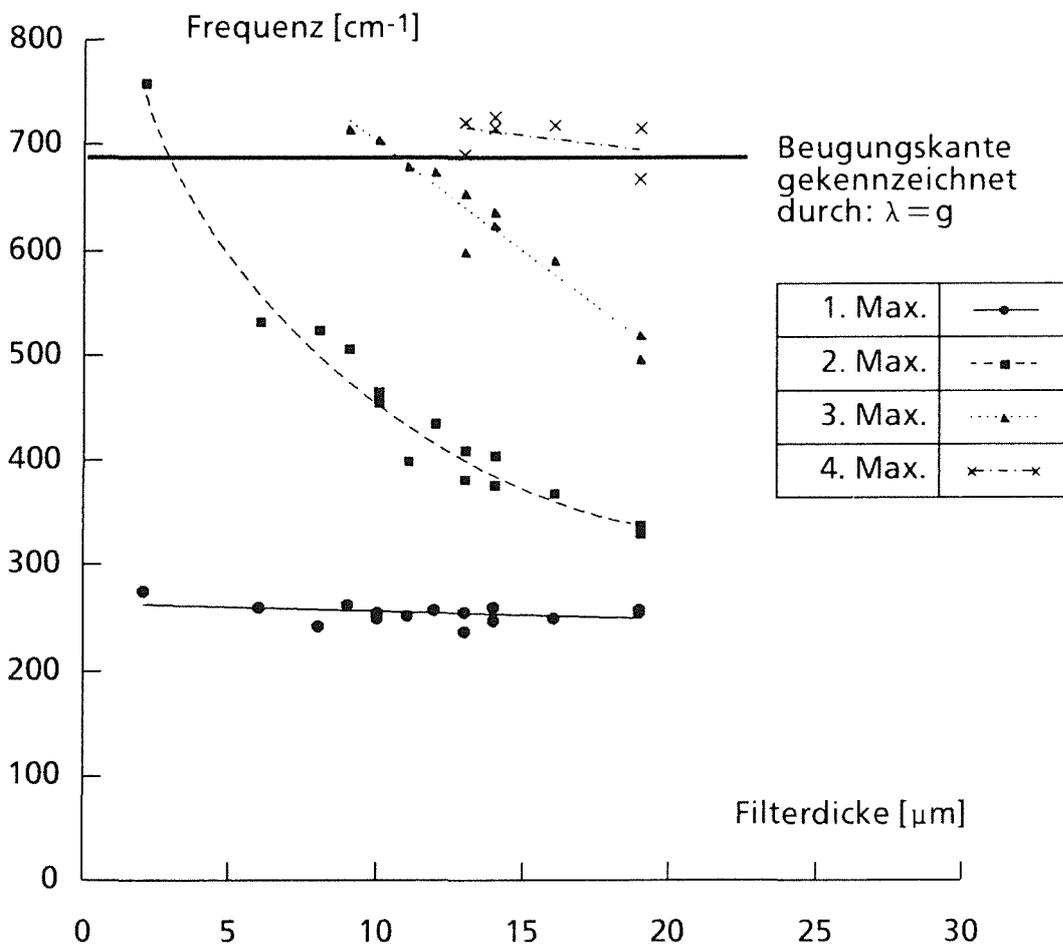


Abb. 39: Lage der Transmissionsmaxima von Filtern mit Tripolschlitzaperturen 'KT' als Funktion der Filterdicke. Es wurden Transmissionsmaxima auch oberhalb der theoretischen Beugungskante (durchgezogene Linie) gemessen.

Für alle Filterstrukturen mit Tripolschlitzaperturen 'KT' mit unterschiedlicher Dicke wurden bei folgenden Frequenzen Transmissionseinbrüche festgestellt:  $220\text{ cm}^{-1}$ ,  $250\text{ cm}^{-1}$ ,  $280\text{ cm}^{-1}$ ,  $435\text{ cm}^{-1}$ ,  $520\text{ cm}^{-1}$ ,  $695\text{ cm}^{-1}$ ,  $740\text{ cm}^{-1}$ ,  $780\text{ cm}^{-1}$ .

In Abb. 40 ist die Trennschärfe von Bandpaßfiltern 'KT' als Funktion der Filterdicke dargestellt. Wie aus den Untersuchungen an Filtern mit Kreuzschlitzaperturen (Abb. 35) festgestellt wurde, nimmt die Trennschärfe mit zunehmender Filterdicke linear zu. Dies wurde auch an Filtern mit Tripolschlitzaperturen bestätigt.

Durch die Beseitigung der Unterplattierung an allen Filtern mit Tripolschlitzaperturen 'KT' konnte die geringe Streuung der Werte für die Trennschärfe erzielt werden.

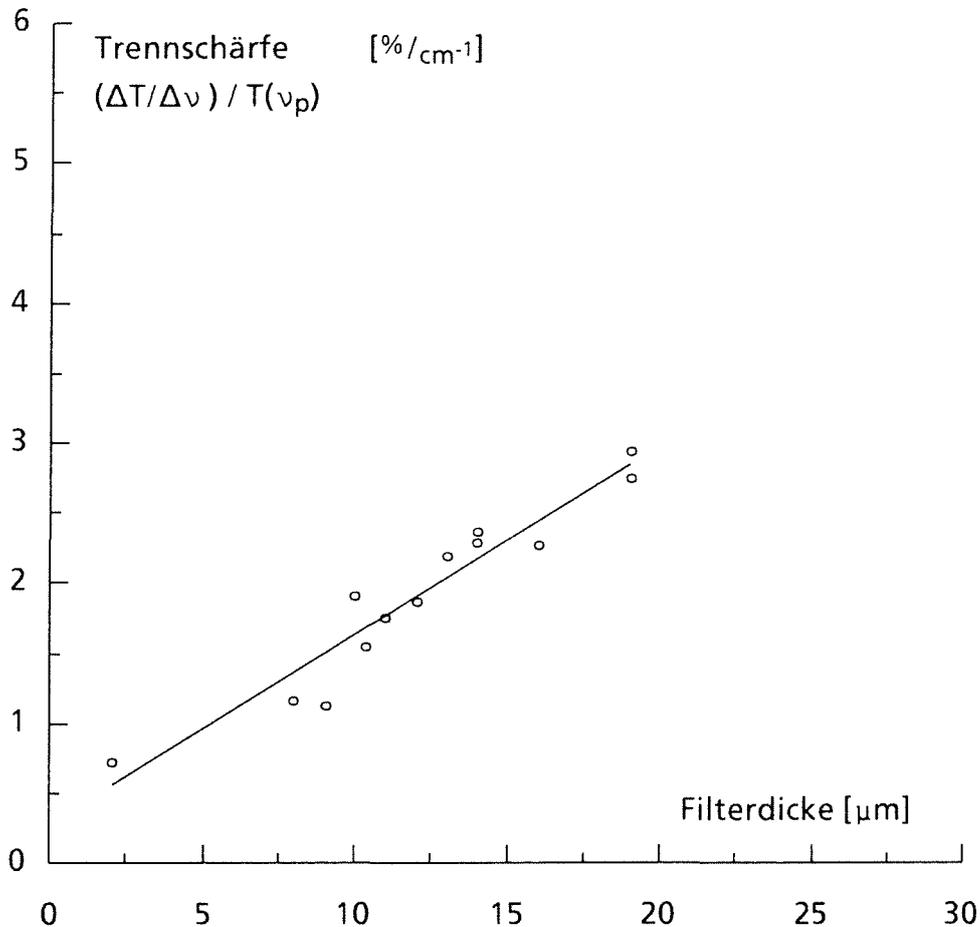


Abb. 40: Trennschärfe von Bandpaßfiltern mit Tripolschlitzaperturen 'KT' als Funktion der Filterdicke. Die Ausgleichskurve zeigt, daß die Trennschärfe von der Filterdicke linear abhängig ist.

#### 4.2.2 Einfluß der Filterdicke auf die Transmissionscharakteristik von Filtern mit Tripolschlitzaperturen 'GT'

An Filtern mit Tripolschlitzaperturen 'GT' wurde eine Filterdickenvariation von 8 bis 23  $\mu\text{m}$  durchgeführt.

Für ein 8  $\mu\text{m}$  dickes Filter wurde eine Transmissionskurve mit zwei Transmissionsmaxima gemessen (Abb. 41):

1. Maximum bei  $165 \text{ cm}^{-1}$  mit 90 % Transmission,
2. Maximum bei  $408 \text{ cm}^{-1}$  mit 38 % Transmission.

Die Lage des zweiten Maximums fällt mit der Beugungskante zusammen. Ab dieser Frequenz wird für höhere Frequenzen Beugung erwartet. Für den Teilstrahl mit Frequenzen in der Nähe der Beugungskante ist anzunehmen, daß er vom Detektor weggebrochen wird. Vermutlich deshalb wurde das zweite Maximum vom Transmissionseinbruch bei ca.  $420\text{ cm}^{-1}$  zerteilt. Ein weiterer Transmissionseinbruch wurde bei  $295\text{ cm}^{-1}$  im Bereich des Transmissionsminimums zwischen den beiden Maxima festgestellt. Die Trennschärfe des Filters beträgt  $1,8\text{ \%/cm}^{-1}$ .

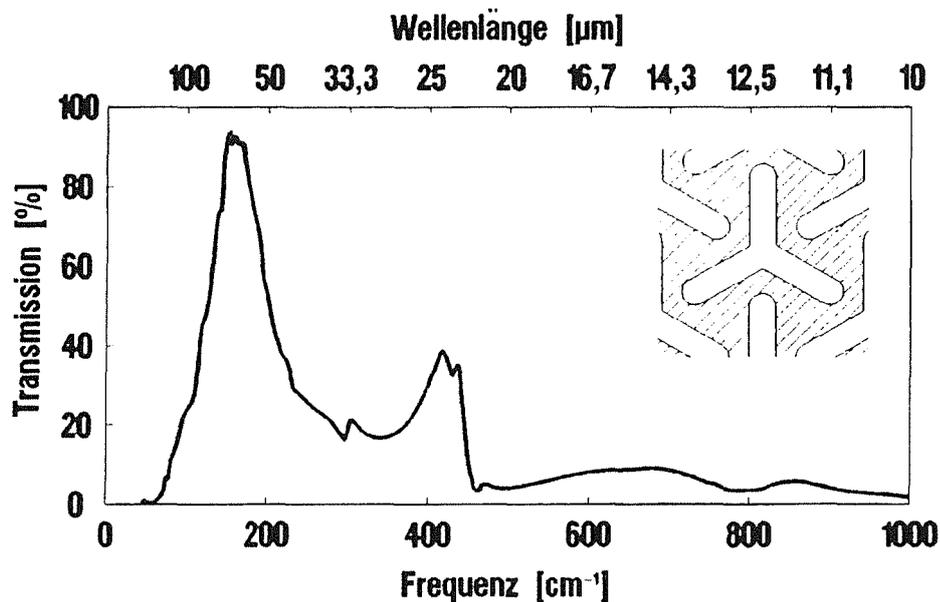


Abb. 41: Transmissionskurve eines  $8\text{ }\mu\text{m}$  dicken Bandpaßfilters aus Kupfer mit Tripolschlitzaperturen 'GT'

Abb. 42 oben stellt die Transmissionskurve einer  $16\text{ }\mu\text{m}$  dicken Filterstruktur dar. Im Paßband wurden drei Maxima gemessen:

1. Maximum bei  $164\text{ cm}^{-1}$  mit  $93\text{ \%}$  Transmission,
2. Maximum bei  $306\text{ cm}^{-1}$  mit  $83\text{ \%}$  Transmission,
3. Maximum bei  $456\text{ cm}^{-1}$  mit  $5\text{ \%}$  Transmission.

Auch in dieser Transmissionskurve ist zu sehen, daß das zweite Transmissionsmaximum im maximalen Transmissionswert durch Transmissionseinbrüche reduziert wurde. Diese Einbrüche treten bei  $295\text{ cm}^{-1}$  und  $335\text{ cm}^{-1}$  auf. Die Trennschärfe dieses Bandpaßfilters wurde zu  $3,1\text{ \%/cm}^{-1}$  ermittelt.

Die Transmissionskurve einer  $23\text{ }\mu\text{m}$  dicken Filterstruktur (Abb. 42 unten) zeigt auch drei Maxima:

1. Maximum bei  $166\text{ cm}^{-1}$  mit  $93\text{ \%}$  Transmission,
2. Maximum bei  $249\text{ cm}^{-1}$  mit  $83\text{ \%}$  Transmission,
3. Maximum bei  $393\text{ cm}^{-1}$  mit  $71\text{ \%}$  Transmission.

Ein viertes Maximum bei  $465\text{ cm}^{-1}$  mit nur 11 % Transmission wurde wegen des Transmissionseinbruchs bei  $435\text{ cm}^{-1}$  dem dritten Maximum zugeordnet. Die Steigung der niederfrequenten Flanke zum Hauptmaximum ist um Faktor 4 höher als in der Transmissionskurve der Filterstruktur mit nur  $8\text{ }\mu\text{m}$  Dicke. Für das  $23\text{ }\mu\text{m}$  dicke Bandpaßfilter wurde eine Trennschärfe von  $6,6\%/_{\text{cm}^{-1}}$  berechnet.

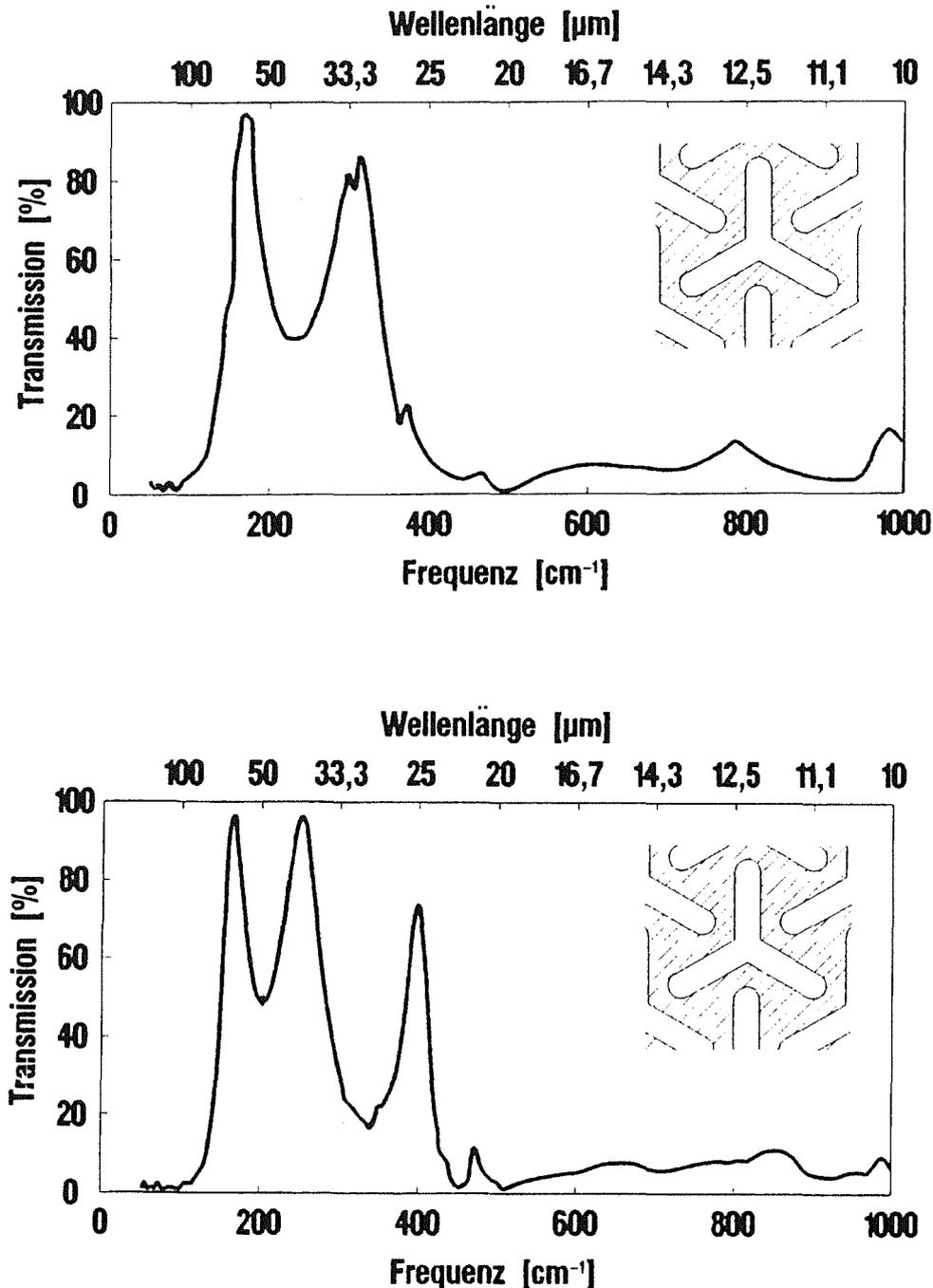


Abb. 42: Transmissionskurve eines  $16\text{ }\mu\text{m}$  (oben) und  $23\text{ }\mu\text{m}$  dicken Filters (unten) aus Kupfer mit Tripolschlitzaperturen 'GT'. Die Trennschärfe des dickeren Filters ist mehr als doppelt so groß als die des dünneren.

Als Übersicht über die durchgeführte Filterdickenvariation an den Filtern 'GT' sind in Abb. 43 die Positionen der Maxima als Funktion der Filterdicke dargestellt. Im Bereich zwischen 8 und 23  $\mu\text{m}$  wurden zwei bis drei Transmissionsmaxima gemessen. Es zeigt sich, daß die Lage des Hauptmaximums von der Filterdicke nahezu unbeeinflusst bleibt. Die Kurvenschar verdeutlicht, daß weitere Maxima sich mit zunehmender Filterdicke der Position des Hauptmaximums nähern. Auch bei diesen Filtern mit Tripolschlitzaperturen wurden Maxima teilweise im Frequenzbereich gemessen, in dem Beugung zu erwarten ist.

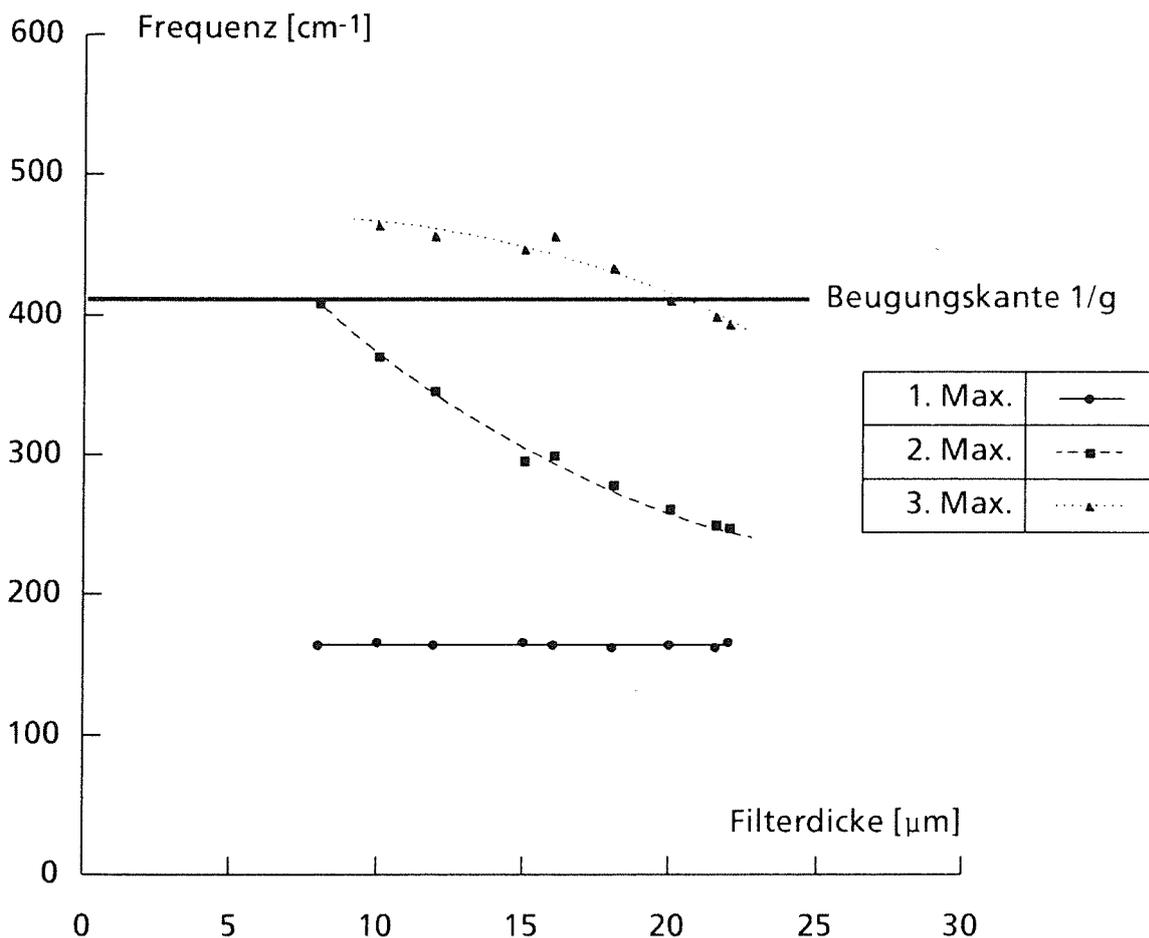


Abb. 43: Lage der Transmissionsmaxima als Funktion der Filterdicke von Filtern aus Kupfer mit Tripolschlitzaperturen 'GT'

Für alle Bandpaßfilter mit Tripolschlitzaperturen 'GT' wurden Transmissionswerte von 90 bis 100 % gemessen. In der Nähe folgender Frequenzen wurden Transmissionsseinbrüche festgestellt: 150  $\text{cm}^{-1}$ , 165  $\text{cm}^{-1}$ , 200  $\text{cm}^{-1}$ , 290  $\text{cm}^{-1}$ , 335  $\text{cm}^{-1}$ , 410  $\text{cm}^{-1}$ , 445  $\text{cm}^{-1}$ , 470  $\text{cm}^{-1}$ , 510  $\text{cm}^{-1}$ .

Die Trennschärfe von Filtern mit Tripolstrukturen 'GT' ist linear abhängig von der Filterdicke. Für dicke Bandpaßfilter wurde eine Schärfe von ca.  $6,6 \text{ \%}/\text{cm}^{-1}$  ermittelt (s. Abb. 44).

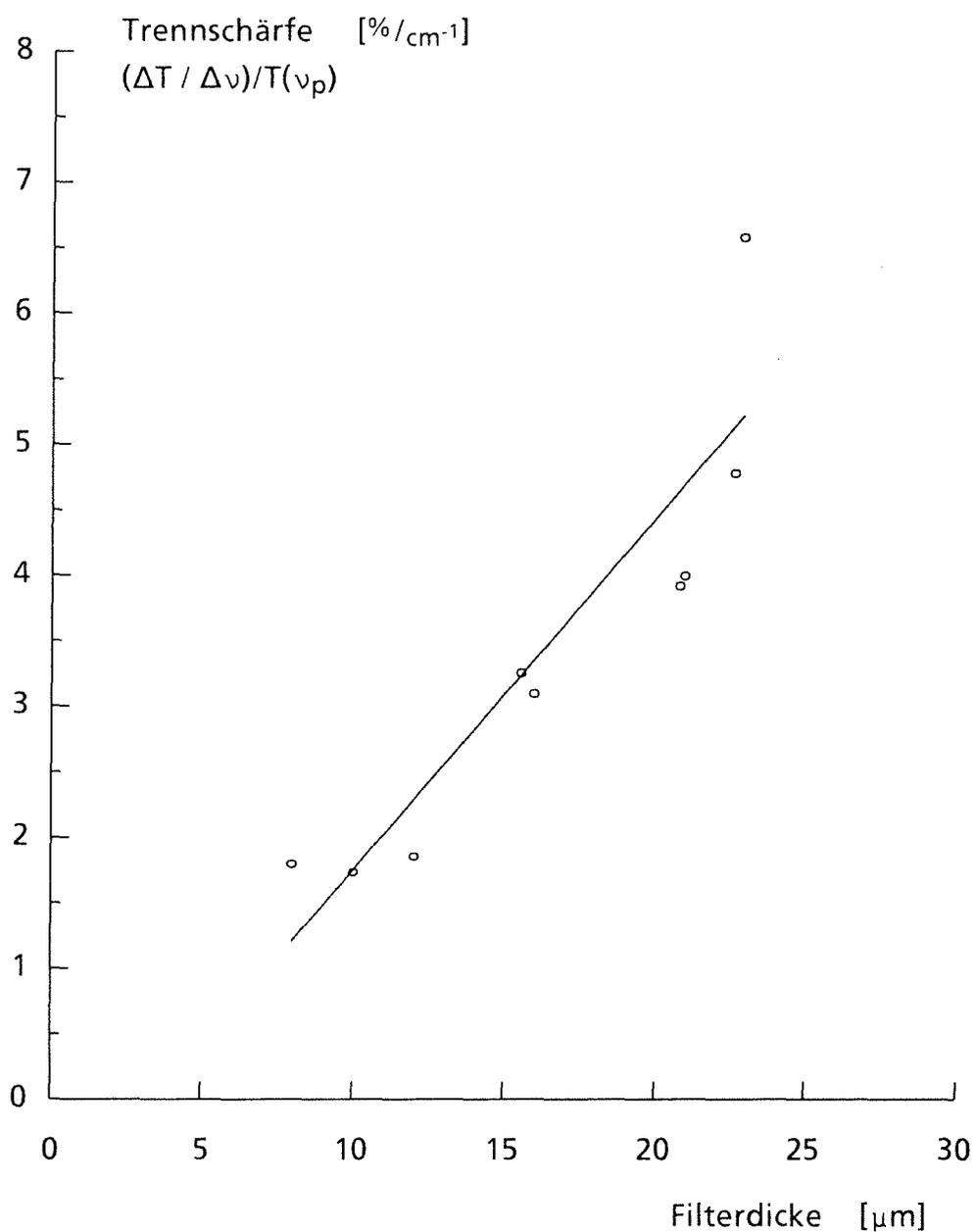


Abb. 44: Trennschärfe von Bandpaßfiltern mit Tripolschlitzaperturen 'GT' als Funktion der Filterdicke. Die berechnete Ausgleichskurve zeigt eine lineare Abhängigkeit der Trennschärfe von der Filterdicke.

#### 4.2.3 Einfluß polarisierter Strahlung auf die Transmissionscharakteristik von Filtern mit Tripolschlitzaperturen

Es ist bekannt, daß ein Gitter mit zweizähliger Symmetrie keine polarisierende Eigenschaft besitzt [7]. Ein solches Gitter hat Strukturen, die gleichzeitig zu zwei senkrecht aufeinanderstehenden Achsen symmetrisch sind.

Dies trifft für Bandpaßfilter mit Tripolschlitzaperturen nicht zu. Tripole sind zu drei Achsen symmetrisch, die jeweils einen Winkel von  $120^\circ$  einschließen. Obwohl Tripolstrukturen keine zweizählige Symmetrie aufweisen, konnte an Filtern mit Tripolschlitzaperturen im infraroten Spektralbereich keine polarisierende Eigenschaft nachgewiesen werden.

Als Nachweis wurden zwei einfache Messungen durchgeführt. Im ersten Fall wurde dasselbe  $19\ \mu\text{m}$  dicke Filter mit Tripolschlitzaperturen 'GT' einmal mit und einmal ohne ein im Strahlengang des FTIR-Spektrometers eingebrachtes Polarisationsfilter vermessen. Um die Messungen nicht nur bezüglich der Lage der Transmissionsmaxima sondern auch bezüglich deren absoluten Transmissionswerten gegenüberstellen zu können, wurde vor allen Messungen eine Referenzmessung mit bzw. ohne Polarisationsfilter durchgeführt, um den Einfluß der Absorption des Polarisationsfilters zu eliminieren.

In beiden Messungen wurde das Filter im Strahlengang so positioniert, daß jeweils ein Tripolarm der Schlitzaperturen waagrecht angeordnet war. Bei den Messungen mit polarisierter Strahlung wurde das Strichgitter des Polarisationsfilters auch waagrecht, d. h. parallel zu einem Tripolarm, ausgerichtet.

Abb. 45 zeigt, daß in den Transmissionsmessungen mit und ohne Polarisationsfilter sowohl gleiche Lagen der Transmissionsmaxima als auch gleiche Transmissionswerte gemessen wurden.

Eine weitere Messung wurde an einem  $8,5\ \mu\text{m}$  dicken Filter mit Tripolschlitzaperturen 'KT' durchgeführt. Hierbei wurde bei konstant polarisierter Strahlung (waagrecht angeordnetes Strichgitter) das Filter in der ersten Messung mit jeweils einem Tripolarm parallel, in der zweiten Messung senkrecht zur Polarisationsrichtung angeordnet. Im ersten Fall sind die beiden anderen Tripolarme um  $60^\circ$ , im zweiten Fall um  $30^\circ$  gegenüber der Polarisationsrichtung gedreht. Auch bei diesen Messungen wurden in beiden Fällen gleiche Transmissionskurven mit gleicher Position und gleichen Transmissionswerten der Maxima ermittelt (s. Abb. 46).

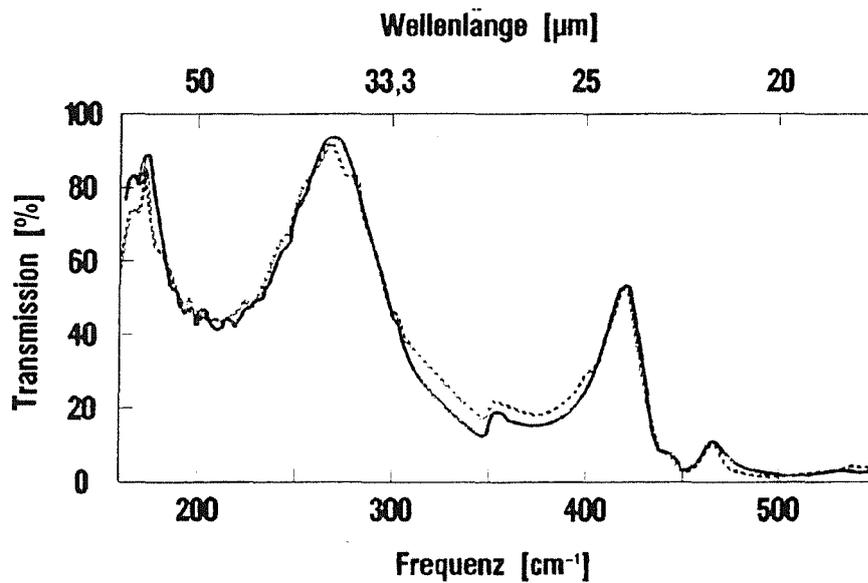


Abb. 45: Transmissionsmessungen ohne (gestrichelte Linie) und mit polarisierter Strahlung (durchgezogene Linie) an einem Filter mit Tripolschlitzaperturen 'GT' mit  $19 \mu\text{m}$  Filterdicke. Es ist kein Unterschied zwischen den Transmissionskurven für polarisierte und unpolarisierte Strahlung zu erkennen.

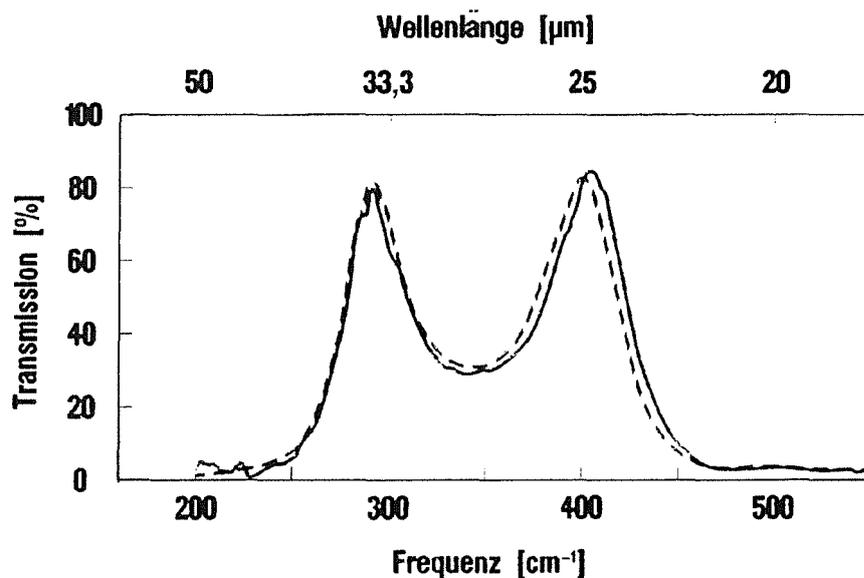


Abb. 46: Transmissionsmessungen unter unterschiedlich polarisierter Strahlung an einem Filter mit Tripolschlitzaperturen 'KT' mit  $8,5 \mu\text{m}$  Filterdicke. Die Schlitzaperturen wurden in einem Fall mit jeweils einem Tripolarm waagrecht (gestrichelte Linie) und im anderen Fall senkrecht (durchgezogene Linie) zur Polarisationssebene ausgerichtet.

## 5. Diskussion

### 5.1 Vergleich zwischen experimentellen und theoretischen Ergebnissen

Mit dem LIGA-Verfahren wurden Infrarotbandpaßfilter mit Kreuzschlitzaperturen und zwei unterschiedlichen Tripolschlitzaperturen mit einer Filterdicke von  $2\ \mu\text{m}$  bis  $29\ \mu\text{m}$  sowohl selbsttragend als auch auf einem Blendenring aus Elektrolytkupfer freitragend hergestellt. Die realisierten Schlitzaperturgeometrien mit Gitterkonstanten von  $14,5\ \mu\text{m}$  bis  $24,5\ \mu\text{m}$  sind weniger als halb so groß wie die kleinsten, die bisher mit herkömmlichen Herstellungsverfahren erzeugt wurden. Damit konnte mit den LIGA-Filtern auch ein höherer Frequenzbereich abgedeckt werden als mit bisherigen Bandpaßfiltern. Das Aspektverhältnis der LIGA-Filter betrug bis zu 21. Die laterale Geometrie wurde mit einer Genauigkeit von  $\pm 30\ \text{nm}$  hergestellt, bei der Filterdicke lag die Genauigkeit bei ca.  $\pm 0,3\ \mu\text{m}$ .

#### 5.1.1 Einfluß der lateralen Geometrie auf die Lage des ersten Transmissionsmaximums

In Transmissionsmessungen an Filtern mit Kreuzschlitz- und Tripolschlitzaperturen wurde gezeigt, daß für unterschiedlich dicke Filter gleicher lateraler Geometrie die Lage des ersten Transmissionsmaximums (Hauptmaximums) praktisch unabhängig von der Filterdicke ist. Zur Berechnung dieser Werte wurden jeweils 25 Filter mit Kreuzschlitzaperturen, 25 Filter mit Tripolschlitzaperturen 'KT' und 20 Filter mit Tripolschlitzaperturen 'GT' mit unterschiedlicher Filterdicke (s. Kap. 4) herangezogen und der Mittelwert aus den jeweiligen Frequenzwerten gebildet, bei denen das Transmissionsmaximum gemessen wurde. Für die drei LIGA-Filtertypen ist in Tab. 4 die gemittelte Position des Hauptmaximums  $\nu_{\text{T}}$  mit Standardabweichung  $s$  aufgelistet.

Schlitzaperturform	Kreuze	Tripole 'KT'	Tripole 'GT'
gemittelte Position $\nu_{\text{T}}$	$289\ \text{cm}^{-1}$	$257\ \text{cm}^{-1}$	$165\ \text{cm}^{-1}$
Standardabweichung $s$	$6,5\ \text{cm}^{-1}$	$7,4\ \text{cm}^{-1}$	$2,2\ \text{cm}^{-1}$

Tab. 4: Aus Transmissionskurven von unterschiedlich dicken Filtern mit jeweils gleicher lateraler Geometrie wurde die gemittelte Position  $\nu_{\text{T}}$  des Hauptmaximums bestimmt. Die niedrigen Werte der Standardabweichung zeigen, daß die Lage dieses Transmissionsmaximums für alle LIGA-Bandpaßfilter praktisch unabhängig ist von der Filterdicke.

Mit den Näherungsformeln /8-10,13/ wurde für die Geometrie der LIGA-Filter die Lage des Hauptmaximums berechnet. Zwischen den berechneten Werten und der aus den Meßwerten der LIGA-Filter gemittelten Position  $\nu_{\neg}$  wurde zwischen 1% und 9 % Abweichung festgestellt. Die gute Übereinstimmung der Werte ist bemerkenswert, nachdem die empirisch gefundenen Näherungsformeln teilweise /9/ oder ausschließlich /10/ an Filtern gewonnen wurden, die mit einem dielektrischen Substrat gestützt waren oder bisher nur für Bandsperrfilter eingesetzt wurden /13/.

Tab. 5 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse aus den Näherungsformeln und stellt die berechnete Position für das Hauptmaximum der aus den Meßwerten von LIGA-Filtern gemittelten Position  $\nu_{\neg}$  gegenüber.

	Näherungsformel für die Lage des Hauptmaximums	berechnete Position $\nu_p$	aus den Meßwerten gemittelte Position $\nu_{\neg}$	prozentuale Abweichung $( \nu_p - \nu_{\neg} ) / \nu_{\neg}$
1	(1) nach /10/	292 cm <sup>-1</sup>	289 cm <sup>-1</sup>	1%
2	$\lambda_p \approx 2,05$ nach /9/	264 cm <sup>-1</sup>	289 cm <sup>-1</sup>	9%
3	$\lambda_p < 1,97$ nach /8/	274 cm <sup>-1</sup>	289 cm <sup>-1</sup>	<5%
4	(5) nach /13/	239 cm <sup>-1</sup>	257 cm <sup>-1</sup>	7%
5	(5) nach /13/	162 cm <sup>-1</sup>	165 cm <sup>-1</sup>	2%

Tab. 5: Vergleich der berechneten Position  $\nu_p$  des Hauptmaximums, die aus den Näherungsformeln /8-10, 13/ mit der jeweiligen LIGA-Geometrie berechnet wurde, mit der gemittelten Position  $\nu_{\neg}$ , die aus den Messungen an LIGA-Filtern mit Kreuzschlitz- (Reihe 1 bis 3) und Tripolschlitzaperturen (Reihe 4: 'KT'; Reihe 5: 'GT') ermittelt wurde.

Für Tripolschlitzaperturen kann eine noch bessere Übereinstimmung gefunden werden, wenn man die Position des Hauptmaximums statt mit der empirischen Formel (5) mit der Formel (4) berechnet, die für Bandsperrfilter mit gekreuzten Dipolen gilt. Wird statt der Dipollänge  $L_D$  der Abstand der äußeren Enden zweier Tripolararme einer Schlitzapertur eingesetzt ( $L_D = l \cdot \cos 30^\circ$ ), so erhält man für beide Tripolschlitzaperturen eine prozentuale Abweichung von nur noch 2 % zwischen

der berechneten Position  $\nu_p$  aus der Näherungsformel und der gemittelten Position  $\nu_m$  des Hauptmaximums. Der Abstand der äußeren Enden zweier Tripolarme entspricht der Projektion einer Tripolstruktur auf eine Gerade, die senkrecht zu einem Tripolschenkel steht und in der Filterebene liegt (s. Abb. 47). Dadurch wird die wirksame Schlitzlänge einer Tripolschlitzapertur in die einer Dipolschlitzapertur umgerechnet, und es ergibt sich folgende Formel für die Lage des Hauptmaximums von LIGA-Bandpaßfiltern mit Tripolschlitzaperturen (vgl. Formel (5) Kap. 2.4):

$$\lambda_p = 2 \cdot l \cos 30^\circ \approx 1,73 \cdot l \quad (6)$$

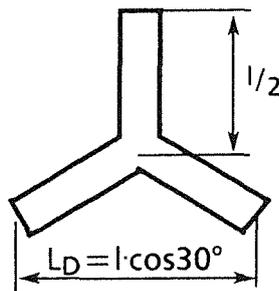


Abb.47: Laterale Geometrie eines Filters mit Tripolschlitzaperturen. Eingezeichnet ist neben der Schenkellänge  $l/2$  die Länge einer projizierten Tripolstruktur:  $l \cdot \cos 30^\circ$ .

### 5.1.2 Einfluß des Materials auf die Transmissionscharakteristik

LIGA-Filter wurden durch galvanische Abscheidung von Kupfer, Gold und Nickel hergestellt. Zunächst wurde vermutet, daß die elektrische Leitfähigkeit des Filtermaterials das Resonanzverhalten der Filter beeinflusst. Dies würde bedeuten, daß man für einen Filter aus Kupfer eine höhere Transmission im Paßband messen würde als für einen Filter aus Nickel, da der spezifische Widerstand von Nickel um den Faktor 4 über dem von Kupfer liegt (s. Tab. 6).

Bei Transmissionsmessungen an Filtern aus unterschiedlichen Metallen (Elektrolyt-Kupfer, -Gold und -Nickel) mit gleicher Geometrie konnte jedoch kein Einfluß des Materials auf die Filtercharakteristik festgestellt werden (s. Kap. 4.1.2). Im Jahr 1962 führten Renk und Genzel /29/ Transmissionsmessungen an einzelnen Streifengittern aus Kupfer und Nickel durch. Auch sie konnten an ihren Gittern keinen Einfluß der Leitfähigkeit auf die Transmissionscharakteristik feststellen.

spezifischer Widerstand	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ( $0^\circ\text{C}$ )
Kupfer	0,016
Gold	0,020
Nickel	0,065

Tab. 6: Spezifischer Widerstand der Metalle Kupfer, Gold und Nickel

### 5.1.3 Einfluß der Unterplattierung auf die Transmissionscharakteristik

Die Unterplattierung (s. Kap. 3.4) beeinflusst nicht die Lage der Transmissionsmaxima, sondern die Transmissionswerte der Maxima (s. Kap. 4.1.3). Nur an unterplattierungsfreien LIGA-Filtern konnten hohe Transmissionswerte und damit ein hoher Kontrast erzielt werden. Für die einzelnen Filtertypen sind in Tab. 7 die gemessenen Transmissionswerte der Hauptmaxima aufgeführt.

Schlitzaperturform	Kreuze	Tripole 'KT'	Tripole 'GT'
Infrarottransmission der Hauptmaxima	55 - 80 %	80 - 100 %	90 - 100 %

Tab. 7: Transmissionswerte der Hauptmaxima von LIGA-Bandpaßfiltern

### 5.1.4 Einfluß der polarisierten Strahlung auf die Transmissionscharakteristik

Es ist bekannt, daß Filterstrukturen mit zweizähliger Symmetrie polarisationsunabhängig sind /7/.

An LIGA-Filtern mit Kreuzschlitz- und Tripolschlitzaperturen wurden Transmissionsmessungen mit und ohne vorgeschaltetem Polarisationsfilter durchgeführt (s. Kap. 4.2.3). An allen drei Bandpaßfiltertypen konnte keine polarisierende Eigenschaft festgestellt werden.

### 5.1.5 Einfluß der Filterdicke auf die Transmissionscharakteristik

Die Simulation von Filtern mit Kreuzschlitzaperturen /11/ zeigt, daß für Filter definierter Dicke neben dem Hauptmaximum ein weiteres Maximum auftritt. Für zunehmende Filterdicke wurden weitere Maxima vorhergesagt, die bei Frequenzen gemessen werden sollten, die größer sind als die des Hauptmaximums. Dies konnte an LIGA-Filtern mit Kreuzschlitz- und Tripolschlitzaperturen experimentell bestätigt werden (s. Kap. 4). Es wurden bis zu fünf Transmissionsmaxima gemessen.

Um die folgenden Ergebnisse der Simulation von Compton et al. /11/ besser mit den Messungen an LIGA-Filtern mit Kreuzschlitzaperturen vergleichen zu können, wurden die dimensionslosen Größen aus /11/ auf die Geometrie der LIGA-Filter umgerechnet. Die absoluten und normierten Maße, bezogen auf die Gitterkonstante von  $20\ \mu\text{m}$ , sind in Tab. 8 aufgelistet.

Spalten-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Geometrievergleich</b>	g	k	j	t	k/g	(k-j)/2g	j/g	t/g
Compton et al.	20 $\mu\text{m}$	17,6 $\mu\text{m}$	3,6 $\mu\text{m}$	3,2 $\mu\text{m}$ 6,4 $\mu\text{m}$ 9,6 $\mu\text{m}$	<b>0,88</b>	<b>0,35</b>	0,18	<b>0,16</b> <b>0,32</b> <b>0,48</b>
LIGA	20 $\mu\text{m}$	18,5 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$ bis 29 $\mu\text{m}$	0,926	0,388	0,15	0,1 bis 1,45

Tab. 8: Vergleich der geometrischen Maße und normierten Maße der simulierten Filter von Compton et al. /11/ und der LIGA-Filter mit Kreuzschlitzaperturen und einer Gitterkonstante von  $g = 20\ \mu\text{m}$

Wie in Spalte 2 und 3 bzw. 6 und 7 zu sehen ist, sind die Kreuzschlitze, die von Compton et al. simuliert wurden, breiter und kürzer als die der LIGA-Filter. Die Schlitzlänge der simulierten Filter liegt um 5 % unter, die Schlitzbreite um 8 % über denen der LIGA-Filter. Damit wurde schon mit der Wahl der lateralen Geometrie der LIGA-Filter - nämlich durch schmale und lange Schlitze - die Voraussetzung für gute Bandpaßeigenschaften geschaffen (s. Kap. 2, Tab. 3).

Aus den experimentellen Ergebnissen /8-10/ und der Simulation /11/ von Filtern mit unterschiedlicher lateraler Kreuzschlitzgeometrie ist bekannt, daß für schmalere und längere Schlitzaperturen die Position des ersten Transmissionsmaximums zu niedrigeren Frequenzen hin verschoben wird. Dies konnte durch

den Vergleich der Ergebnisse der Simulation und der Messungen an LIGA-Filtern bestätigt werden (s. Abb. 48). Trotz etwas unterschiedlicher lateraler Geometrie kann auch in diesem Fall die Übereinstimmung als gut bezeichnet werden, da die prozentuale Abweichung je nach Filterdicke nur 2 bis 5 % beträgt.

Compton et al. zeigen durch die Variation von lateraler Geometrie und Filterdicke, daß die Lage der dem Hauptmaximum nachfolgenden Maxima überwiegend durch die Filterdicke bestimmt wird. Deshalb war zu erwarten, daß die Simulation und die Messung gleich dicker LIGA-Filter gleiche Positionen der dem Hauptmaximum folgenden Maxima liefern. Beim Vergleich der berechneten und gemessenen Lage des zweiten Maximums wurden prozentuale Abweichungen unter 2 % festgestellt. Dies bestätigt, wie auch in Abb. 48 zu sehen ist, daß die Ergebnisse aus der Variation der Filterdicke zwischen der Simulation /11/ und der Messung an LIGA-Filtern sehr gut übereinstimmen.

Eine Ausnahme bilden die 2 und 3  $\mu\text{m}$  dicken LIGA-Filterstrukturen, für die ein einziges Maximum festgestellt wurde. Nach der Simulation von Compton et al. sollte für ein 3,2  $\mu\text{m}$  dickes Filter bei einer Wellenzahl von  $489\text{ cm}^{-1}$  ein zweites Maximum gemessen werden können. Der Energieanteil der Strahlung mit Frequenzen oberhalb  $500\text{ cm}^{-1}$  wird in den Halbraum hinter dem Filter gebeugt (s. Kap. 2.3.1). Das berechnete Maximum liegt nahe an der Beugungskante. Es ist wahrscheinlich zu schmal, um im Experiment vom Detektor noch getrennt vom Beugungsgebiet aufgelöst und als solches gemessen werden zu können. Würde man als gemessenen Wert die Frequenz  $500\text{ cm}^{-1}$  einsetzen, so wäre die Abweichung zur Simulation nur 2%. Für dickere Filter stimmen die gemessenen und die in /11/ berechneten Werte für die Maxima sehr gut überein. Zusätzlich zeigen sowohl die Simulation /11/ als auch die experimentellen Ergebnisse /z. B. 8/, daß das Sperrverhalten von Bandpaßfiltern im niederfrequenten Spektralbereich auch durch schmalere Kreuzschlitzaperturen etwas verbessert werden kann (s. Kap. 2). Das Verkleinern der Schlitzbreite hat jedoch eine Grenze, die von eingesetzten Fertigungsverfahren abhängt. Mit dem LIGA-Verfahren konnte eine relative Schlitzbreite von  $j/g=0,15$  realisiert werden. Bisher sind keine Experimente bekannt, in denen freitragende Filterstrukturen mit solch kleinen Schlitzbreiten (zwischen 3 und 5  $\mu\text{m}$ ) hergestellt wurden.

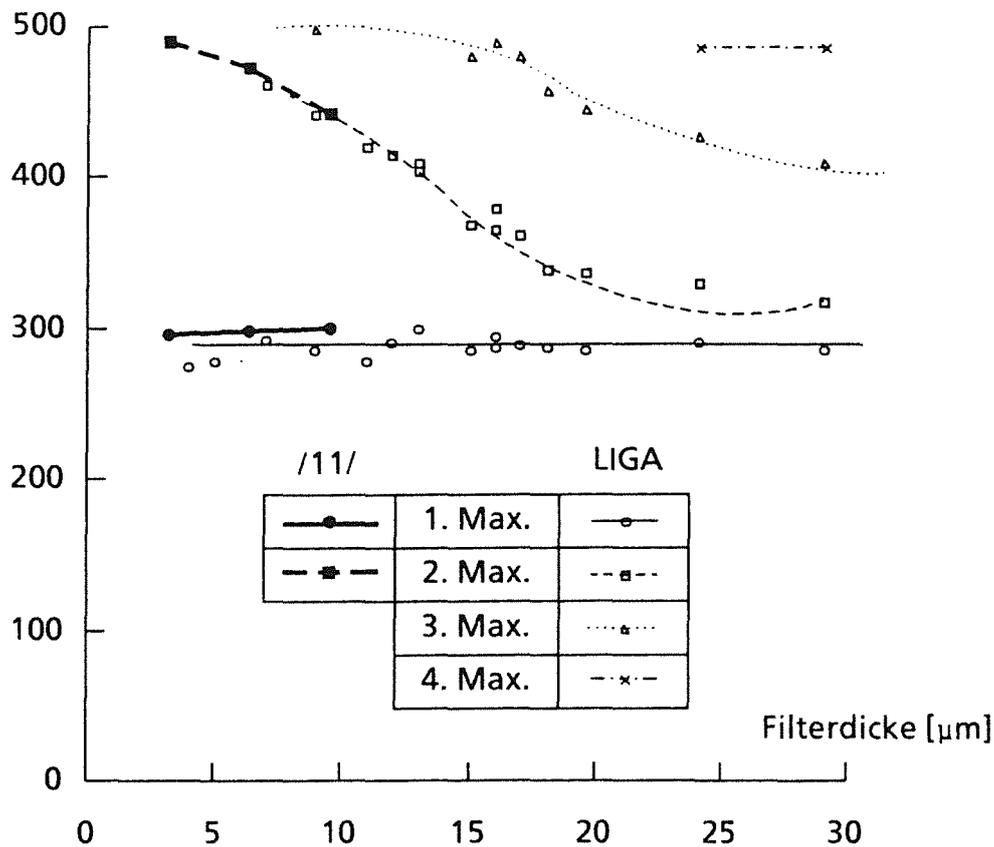
Wellenzahl [cm<sup>-1</sup>]

Abb. 48: Vergleich zwischen berechneten und experimentell ermittelten Transmissionsmaxima von Infrarotbandpaßfiltern als Funktion der Dicke der Filter. Die dünn gezeichnete Kurvenschar wurde aus den Transmissionsmessungen an LIGA-Filtern gewonnen. Die ungefüllten Symbole repräsentieren die gemessenen Transmissionsmaxima. Die dicken Linien mit den ausgefüllten Symbolen geben die Ergebnisse der Simulation von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen wieder /11/. Die durchgezogenen Linien zeigen die jeweilige Lage des Hauptmaximums, die praktisch unbeeinflusst von der Filterdicke ist. Die gestrichelte Linie gibt die Lage des zweiten Transmissionsmaximums bei entsprechender Filterdicke an, die punktierte Linie die des dritten und die Strichpunktlinie die des vierten Maximums. Deutlich zu sehen ist die gute Übereinstimmung der Simulation mit den Ergebnissen an LIGA-Filtern, besonders für das zweite Maximum, dessen Lage durch die Filterdicke bestimmt wird. Das Hauptmaximum der LIGA-Filter wurde bei etwas niedrigeren Frequenzen gemessen als die berechneten Werte nach /11/, da die Schlitzaperturen der LIGA-Filter schmaler hergestellt wurden.

Nach den Ergebnissen der Simulation von Compton et al. /11/ soll das Sperrverhalten von Bandpaßfiltern entscheidend verbessert werden können, wenn man die Filterdicke erhöht. Dies konnte an LIGA-Filtern durch Transmissionsmessungen im Infrarotbereich nachgewiesen werden.

An LIGA-Filtern wurde festgestellt, daß mit zunehmender Filterdicke sich sowohl die Trennschärfe als auch gleichermaßen das Sperrverhalten verbessert. Der Wert der Trennschärfe kann nur an Filtern gleichen Filtertyps verglichen werden, da er von der spektralen Lage des Paßbands abhängt. Gute Bandpaßfilter besitzen hohe Werte für die Trennschärfe. Eine hohe, auch für spezielle Anforderungen von ISOPHOT ausreichende Trennschärfe besitzen Bandpaßfilter, deren Dicke ungefähr der Schlitzlänge (bei Kreuzschlitzaperturen) bzw. Schenkellänge (bei Tripolschlitzaperturen) entspricht.

Compton et al. /11/ regten 1983 eine experimentelle Bestätigung ihrer Simulation an. Dies konnte bisher an Infrarotbandpaßfiltern nicht erfolgen, da ein geeignetes Verfahren zur Herstellung dicker Filterstrukturen nicht zur Verfügung stand. Auch im Mikrowellenbereich sind keine entsprechenden experimentellen Untersuchungen bekannt.

Ebenso wäre eine theoretische Behandlung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit besonders interessant, wobei die Transmissionscharakteristik von unterschiedlich dicken Bandpaßfiltern mit Tripolschlitzaperturen simuliert werden sollte. Wünschenswert wäre auch eine Erweiterung der bisher durchgeführten Simulation an Filtern mit Kreuzschlitzaperturen, in der Berechnungen auch für Filter durchgeführt werden, deren Dicke größer ist als der halbe Wert der Gitterkonstante.

## 5.2 Vergleich der beiden Fertigungsvarianten zur Herstellung von LIGA-Filtern

Alle Infrarotbandpaßfilter wurden nach dem LIGA-Verfahren mit Hilfe der Röntgentiefenlithographie und der Mikrogalvanoformung hergestellt. Die Besonderheit bei der Herstellung der Filter gegenüber anderen LIGA-Mikrostrukturen sind vor allem die speziellen Substrate, mit denen die Herstellung von freitragenden Filtern auf Blendenringen durchgeführt wurde.

Eine Fertigungsvariante wurde mit einem **zusammengesetzten Substrat** durchgeführt, das aus einem Kupferring mit einem Titankern besteht.

Der große Vorteil des zusammengesetzten Substrats besteht darin, daß die Filtermembran über einen Materialscluß fest mit dem Blendenring verbunden ist. Dies war der ausschlaggebende Grund, warum diese Herstellungsvariante durchgeführt wurde. Hierbei wird das Filter freitragend hergestellt, indem der massive Titankern von ca. 9 mm Durchmesser und 2 mm Dicke aufgelöst wird. Dieser Vorgang könnte beschleunigt und auch für dünne Filtermembranen ohne Gefahr einer Beschädigung der Filterstruktur durchgeführt werden, wenn eine Ätzlösung für Titan zur Verfügung stünde, in der die Wasserstoffblasenbildung unterdrückt wäre.

Bei der zweiten Herstellungsvariante wurde ein **mehrschichtiges Substrat** verwendet, ein Siliziumwafer, der mit einer Graphit- und Titanschicht besputtert wurde. Stellt man beide Varianten gegenüber, so ergeben sich zwei entscheidende Vorteile für das mehrschichtige Substrat.

Erstens ist für die Herstellung des mehrschichtigen Substrats ein vergleichsweise geringer Zeitaufwand erforderlich. Eine Sputteranlage wird mit mehreren kommerziell erhältlichen Wafern bestückt, und in zwei direkt aufeinanderfolgenden Sputterprozessen werden die Graphit- und die Titanschicht aufgebracht. Zweitens ist durch die einfache Herstellung das mehrschichtige Substrat relativ kostengünstig.

Beim mehrschichtigen Substrat ist ein Klebevorgang notwendig, um den Blendenring mit der Filtermembran zusammenzufügen. Es wurden an unterschiedlich dicken Filtern erfolgreich Tests bei Temperaturen von 4,2 K und Beschleunigungen von bis zu 25 g durchgeführt, in denen die Einsatzbedingungen von ISO simuliert wurden. Auch die Klebeverbindung hat diesen Temperaturen und den Beschleunigungen senkrecht und parallel zur Klebefuge standgehalten. Deshalb wurden alle Filter, die für ISOPHOT hergestellt wurden, auf einen Blendenring geklebt, um zur Vereinfachung der Qualifikation einen für alle Filter einheitlichen Aufbau zu liefern. Alle für ISOPHOT gefertigten Infrarotfilter haben den Qualifikationstests für ISO standgehalten /39/.

### 5.3 Auswahl der Bandpaßfilter für ISOPHOT

Berücksichtigt man nur eine optimale Einstellung der Trennschärfe und des Sperrverhaltens von Bandpaßfiltern für ISOPHOT, so wäre eine maximale Filterdicke zu realisieren. Neben diesen Anforderungen ist jedoch für jeden Filtertyp, der bei ISOPHOT zum Einsatz kommt, eine unterschiedlich geringe Bandbreite  $B = \nu_p / \Delta \nu$

(Tab. 9, Zeile 4) vorgegeben. Die Bandbreite und die Soll-Peakwellenlänge<sup>21</sup> (Tab. 9, Zeile 1) bestimmen den gewünschten Meßbereich des entsprechenden Detektors.

Der tatsächliche Meßbereich wird bei niedrigen Frequenzen durch die Flanke der Transmissionskurve des Bandpaßfilters erzeugt und bei hohen Frequenzen durch einen zusätzlichen Tiefpaßfilter begrenzt. Damit der tatsächliche Meßbereich mit dem gewünschten übereinstimmt, soll zunächst die Ist-Peakwellenlänge mit dem Sollwert übereinstimmen. Weiterhin soll die Lage der niederfrequenten Flanke mit der durch die Bandbreite definierten niederfrequenten Grenze  $\nu_p - \Delta\nu/2$  des Meßbereichs übereinstimmen. Dies ist der Fall, wenn die Lage des Transmissionsminimums zwischen dem Hauptmaximum und dem ihm folgenden zweiten Maximum mit der hochfrequenten Meßbereichsgrenze  $\nu_p + \Delta\nu/2$  übereinstimmt. Diese Meßbereichsgrenze wird durch die Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters  $\nu_s$  erzeugt. Deshalb muß die Lage des Transmissionsminimums  $\nu_p + \Delta\nu/2$  mit der Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters  $\nu_s$  zusammenfallen (Tab. 9, Zeile 6).

	Schlitzaperturform	Kreuze	Tripole 'KT'	Tripole 'GT'
1	Soll -Peakwellenlänge $\lambda_p'$	35 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	60 $\mu\text{m}$
2	Ist -Peakwellenlänge $\lambda_p$	34,5 $\mu\text{m}$	39 $\mu\text{m}$	60,2 $\mu\text{m}$
3	Peakfrequenz $\nu_p = 1/\lambda_p$	289 $\text{cm}^{-1}$	257 $\text{cm}^{-1}$	165 $\text{cm}^{-1}$
4	Bandbreite $B = \nu_p/\Delta\nu$	4	2	1,5
5	Halbwertsbreite $\Delta\nu = 1/(\lambda_p \cdot B)$	73 $\text{cm}^{-1}$	128 $\text{cm}^{-1}$	111 $\text{cm}^{-1}$
6	Lage des Minimums $\nu_p + \Delta\nu/2$	326 $\text{cm}^{-1}$	321 $\text{cm}^{-1}$	222 $\text{cm}^{-1}$
7	ermittelte Filterdicke t	18,5 - 20 $\mu\text{m}$	10,5 - 11,5 $\mu\text{m}$	19 - 20 $\mu\text{m}$

Tab. 9: Charakteristische spektrale Daten von Bandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen, Tripolschlitzaperturen 'KT' und 'GT'. Aus den spektralen Daten wurde die Filterdicke der LIGA-Filter ermittelt, die bei ISOPHOT eingesetzt werden sollen.

Die Lage des Transmissionsminimums  $\nu_s = \nu_p + \Delta\nu/2$  wird - wie die Lage der dem Hauptmaximum folgenden Maxima - durch die Filterdicke beeinflusst. Durch die vorgegebene Bandbreite wird die zunächst maximal gewünschte Filterdicke auf einen engen Variationsbereich begrenzt (Tab. 9, Zeile 7). Innerhalb dieses für jeden Filtertyp unterschiedlichen zulässigen Variationsbereichs der Filterdicke

<sup>21</sup> Die Peakwellenlänge (Peakfrequenz) gibt die Lage des Hauptmaximums an.

wurden die Bandpaßfilter für ISOPHOT in der maximal möglichen Filterdicke hergestellt.

Die Bandpaßfilter für ISOPHOT mit Kreuzschlitzaperturen wurden in der Filterdicke von 20  $\mu\text{m}$  gefertigt. Die Filter mit den Tripolschlitzaperturen 'KT' erhielten eine Filterdicke von 11,5  $\mu\text{m}$ , die mit den Tripolstrukturen 'GT' eine Dicke von 20  $\mu\text{m}$ .

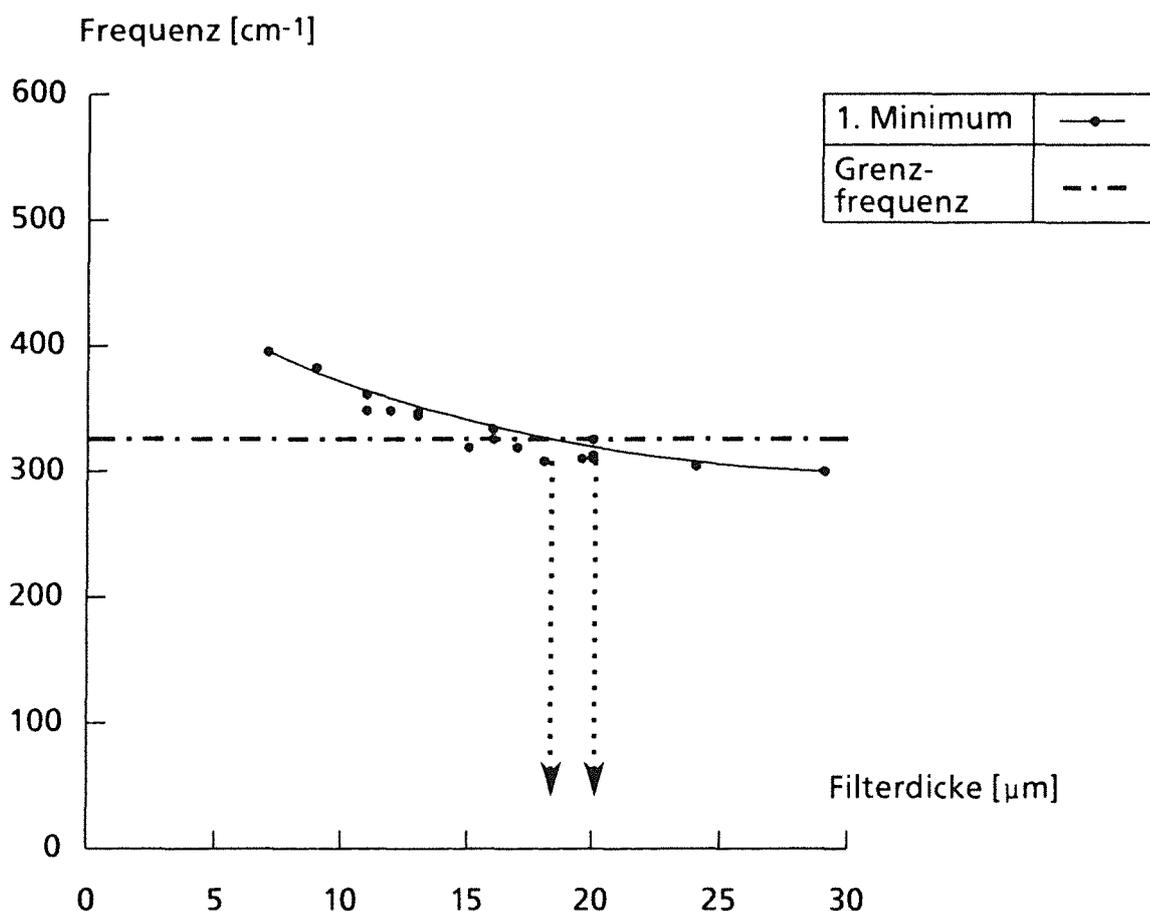


Abb. 49: Lage des Transmissionsminimums  $\nu_p + \Delta\nu/2$  zwischen den ersten beiden Maxima von Infrarotbandpaßfiltern mit Kreuzschlitzaperturen als Funktion der Filterdicke. Die Filterdicke von  $t=18,5$  bis 20  $\mu\text{m}$  der Bandpaßfilter für ISOPHOT ergibt sich aus der Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters  $\nu_s$  bei 326  $\text{cm}^{-1}$ , die mit dem ersten Transmissionsminimum zusammenfallen soll.

In den Abb. 49 - 51 ist die Lage des Transmissionsminimums zwischen dem Hauptmaximum und dem zweiten Maximum als Funktion der Filterdicke für die Bandpaßfilter mit den drei verschiedenen Schlitzaperturtypen dargestellt. Die Filter-

dicke der Filter für ISOPHOT ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Kurve des ersten Transmissionsminimums  $\nu_p + \Delta\nu/2$  mit der hochfrequenten Grenze des gewünschten Meßbereichs der Detektoren, die in der Praxis durch die Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters  $\nu_s$  erzeugt wird.

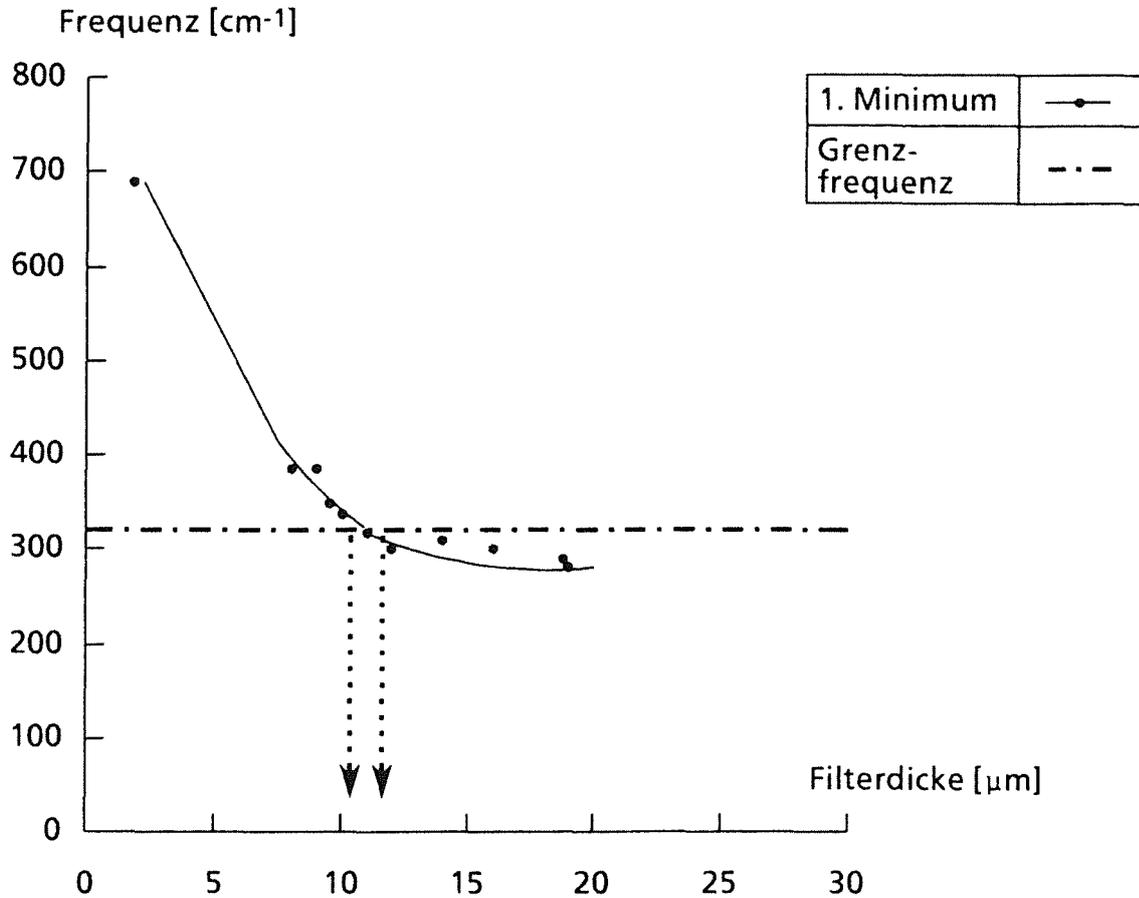


Abb. 50: Lage des Transmissionsminimums  $\nu_p + \Delta\nu/2$  zwischen den ersten beiden Maxima von Infrarotbandpaßfiltern mit Tripolschlitzaperturen 'KT' als Funktion der Filterdicke. Die Filterdicke von  $t=10,5$  bis  $11,5 \mu\text{m}$  der Bandpaßfilter für ISOPHOT ergibt sich aus der Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters  $\nu_s$  bei  $321 \text{ cm}^{-1}$ , die mit dem ersten Transmissionsminimum zusammenfallen soll.

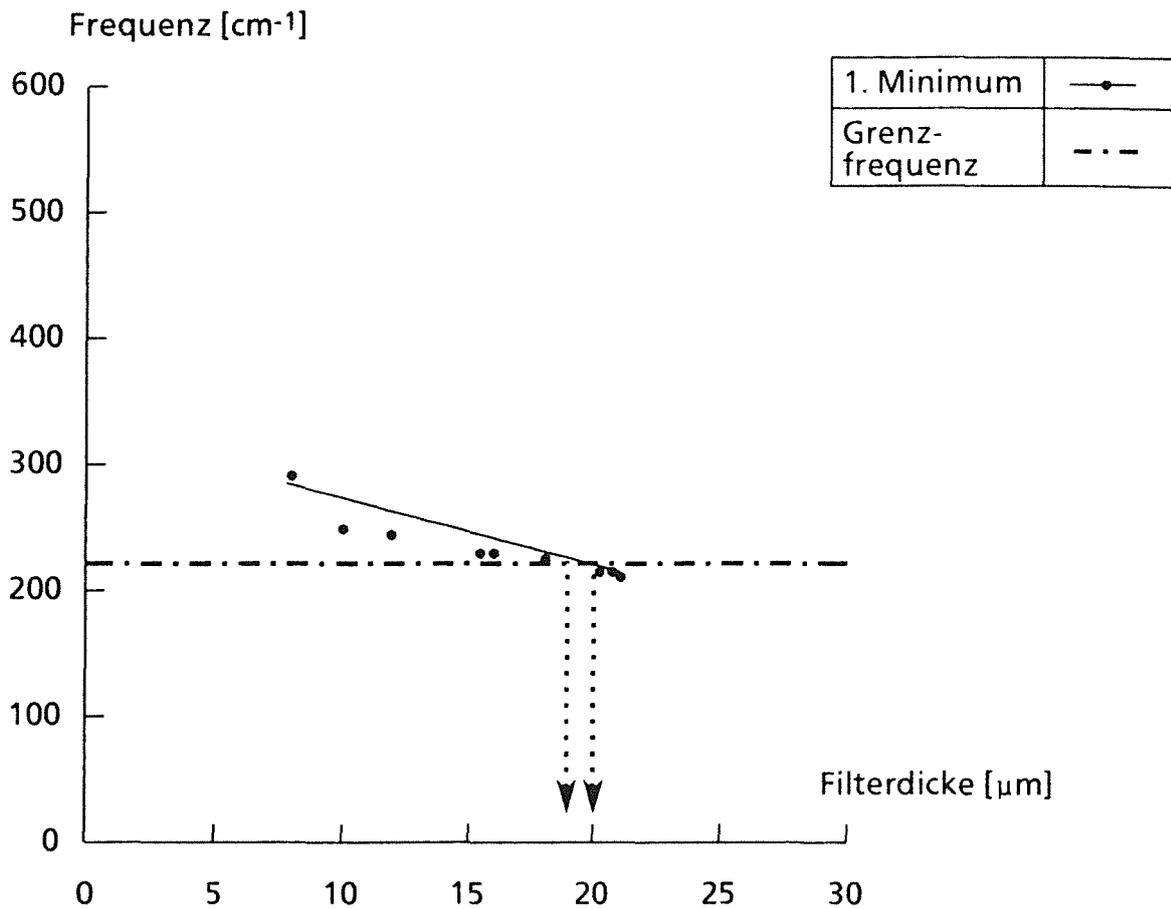


Abb. 51: Lage des Transmissionsminimums  $\nu_p + \Delta\nu/2$  zwischen den ersten beiden Maxima von Infrarotbandpaßfiltern mit Tripolschlitzaperturen 'GT' als Funktion der Filterdicke. Die Filterdicke von  $t=19 \mu\text{m}$  bis  $20 \mu\text{m}$  der Bandpaßfilter für ISOPHOT ergibt sich aus der Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters  $\nu_s$  bei  $222 \text{ cm}^{-1}$ , die mit dem ersten Transmissionsminimum zusammenfallen soll.

## 6. Anhang: Das Weltraumexperiment ISOPHOT

Die nach dem LIGA-Verfahren hergestellten Infrarotbandpaßfilter wurden so konzipiert, daß sie im Photometer des ISO-Satelliten eingesetzt werden können. Voraussichtlich im Jahr 1993 soll ISO (*infrared space observatory*), ein Weltraumobservatorium der ESA, mit der Ariane - 4 - Rakete starten. Der Satellit (5,2 m hoch, 2,3 m breit und 2,3 t schwer) soll seine Umlaufbahn mit einer größten Erdnähe von 1000 km und einer größten Erdferne von 70 000 km in 24 h durchfliegen /4/. Durch ihn sollen 18 Monate lang neue Informationen über die Infrarotstrahlung astronomischer Objekte gewonnen werden.

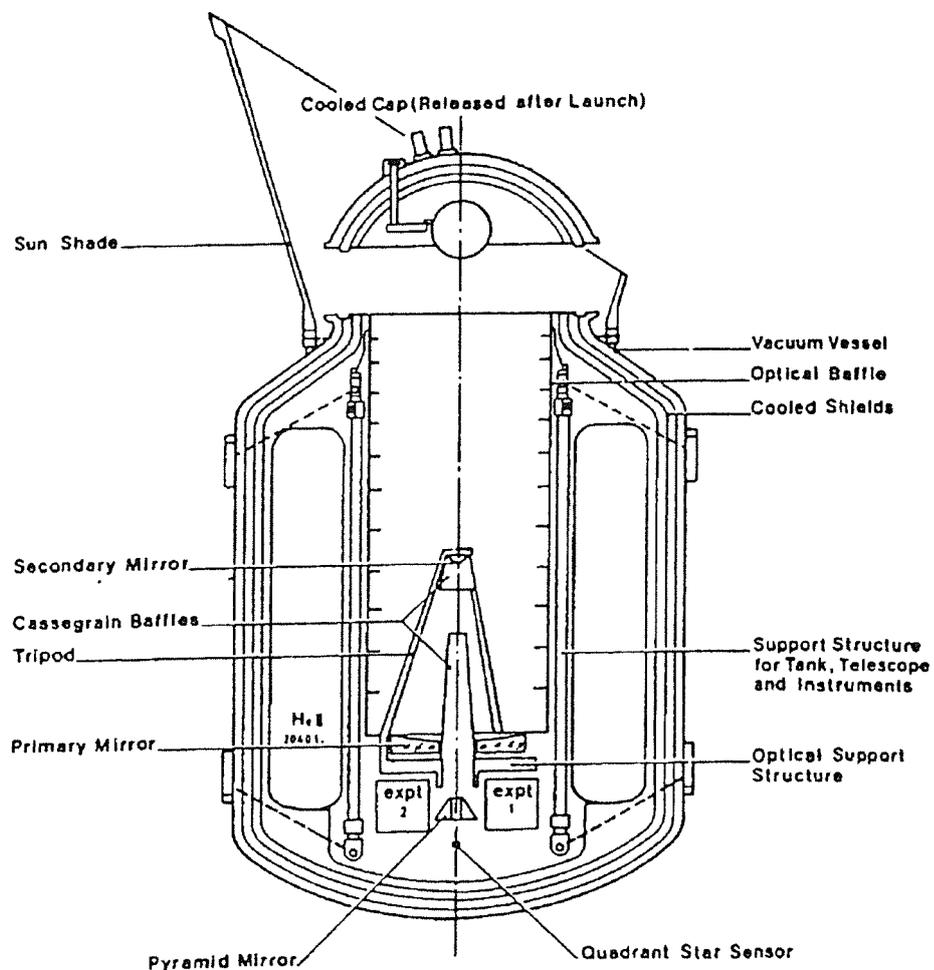


Abb. 52 : Schematische Zeichnung der ISO - Nutzlast - Kapsel /3/. Umgeben von Strahlungsschild und Kühltank mit flüssigem Helium liegen die optischen Experimente von ISO in der Mitte des Satelliten. Die von oben einfallende Strahlung wird nach mehrfacher Umlenkung auf den unten liegenden pyramidenförmigen Spiegel fokussiert und von dort in die vier Experimentenkammern gelenkt.

ISO wird im Wellenlängenbereich zwischen 3  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$  Messungen vornehmen, die an erdgebundenen Teleskopen wegen der Infrarotabsorption des Wasserdampfes der Atmosphäre nicht möglich sind. Durch Kühlung des Weltraumteleskops ISO mit flüssigem Helium (2 - 7 K) wird das in diesem Wellenlängenbereich störende Photonenrauschen unterdrückt. In Abb. 52 ist ein Querschnitt durch das Observatorium ISO skizziert.

Das Photometer ISOPHOT belegt einen Quadranten der Instrumentenkammer des Teleskops des ISO - Satelliten. Die Infrarotstrahlung wird von einer der 45° Seitenflächen eines zentralen pyramidenförmigen Spiegels aus der Teleskoplängsachse in das Experiment ISOPHOT gelenkt (s. Abb. 53) /4/. In dem Quadranten für ISOPHOT sind vier Untersysteme auf bestimmte photometrische Messungen spezialisiert:

- ISOPHOT - P      ein Photopolarimeter mit verschiedenen spektralen Bändern und Blenden für den Wellenlängenbereich 30 - 250  $\mu\text{m}$
- ISOPHOT - C      eine photometrische Kamera mit verschiedenen spektralen Bändern für den Wellenlängenbereich 30 - 250  $\mu\text{m}$
- ISOPHOT - A      zwei bis drei Detektorzeilen  
für eine photometrische Kartierung 3 - 18 (30)  $\mu\text{m}$
- ISOPHOT - S      zwei Spektrometer für den Wellenlängenbereich 3 - 18  $\mu\text{m}$ .

Die letzten beiden Untersysteme sind für das Nahe Infrarot bestimmt.

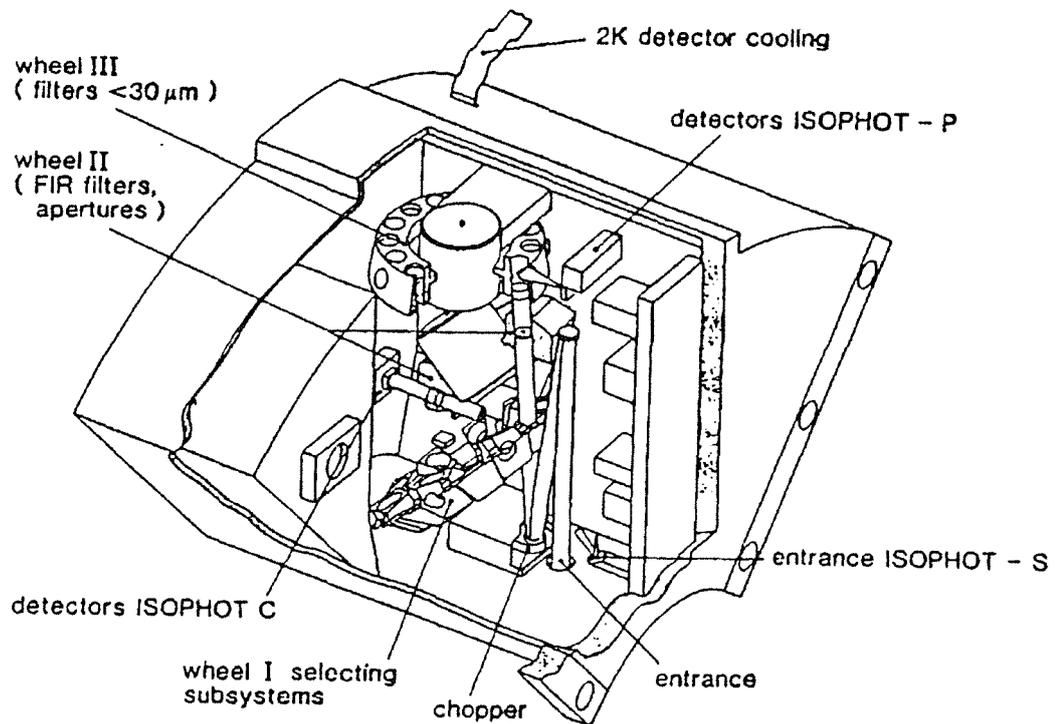


Abb. 53: Schematische Darstellung von ISOPHOT, dem Photometer in einem der Quadranten der Experimentenebene des ISO - Satelliten. Die Detektorzeilen von ISOPHOT - A befinden sich in dieser Ansicht vor den Filterrädern und sind der Übersichtlichkeit wegen nicht eingezeichnet /4/. Das Rad II ist nur als Bruchstück, das Rad III nur zu Dreiviertel eingezeichnet, um den Verlauf des Strahls, der unten eintritt und als Säulenstück gezeichnet ist, besser verfolgen zu können. Die Infrarotbandpaßfilter sitzen gemeinsam mit Quarz, Saphir und Tiefpaßfiltern in den zylindrischen Öffnungen der Filterräder.

## 7. Literaturverzeichnis

- /1/ E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer:  
Fabrication of microstructures with high aspect ratio and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofarming and plastic molding (LIGA Process);  
Microelectronic Engineering 4 (1986) 35-56.
- /2/ E. W. Becker, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer:  
Untersuchungen zur Abbildungsgenauigkeit der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung bei der Herstellung technischer Trenndüsen-elemente;  
KfK-Bericht Nr. 3732 (1984), Dissertation: D. Münchmeyer, Universität Karlsruhe (1984).
- /3/ M. F. Kessler:  
The Infrared Space Observatory (ISO);  
Instrumentation for optical remote sensing from space;  
SPIE 589 (1985) 201-207.
- /4/ D. Lemke, J. Wolf, Ch. Hajdak, H. Hajdak, G. Kulzer, H. Altfeld, A. Salama, E. Grün, W. Krätschmer, H. Völk, R. Tuffs, R. Joseph, M. Selby, M. Wells, J. Abolins, P. Vaughan, H. Schnopper, I. Rasmussen, B. Reipurth, V. Costa, E. Kreysa, H.-P. Gemünd, L. Drury:  
ISOPHOT - Photometer für den ISO Satelliten;  
Mitteilungen Astronomische Gesellschaft Nr. 68, Hamburg (1987) 191 - 200.
- /5/ H. A. Smith, R. L. Carovillano:  
The Infrared Space Observatory;  
Appl. Opt. 23 (1984) 3243 - 3244.
- /6/ B. D. Guenther, P. W. Kruse:  
Submillimeter Wave Detector Workshop;  
Infrared and Millimeter Waves 7 (1986) 1091-1109.

- /7/ R. Ulrich:  
Interference filters for far infrared;  
Appl. Opt. **7** (1968) 1987 - 1996.
- /8/ H. -P. Gemünd:  
Filter für den submm-Bereich;  
Kleinheubacher Berichte **29** (1986) 501 - 505;  
Herausgeber: Fernmeldetechnisches Zentralamt, Darmstadt.
- /9/ S. T. Chase, R. D. Joseph:  
Resonant array bandpass filters for the far infrared;  
Appl. Opt. **22** (1983) 1775 - 1779.
- /10/ C. T. Cunningham:  
Resonant grids and their use in the construction of submillimetre  
filters;  
Infrared Phys. **23** (1983) 207 - 215.
- /11/ R. C. Compton, R. C. McPhedran, G. H. Derrick, L. C. Botton:  
Diffraction properties of a bandpass grid;  
Infrared Phys. **23** (1983) 239 - 245.
- /12/ L. B. Whitbourn, R. C. Compton:  
Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric  
boundary;  
Appl. Opt. **24** (1985) 217 - 220.
- /13/ C. M. Rhoads, E. K. Damon, B. A. Munk:  
Mid-infrared filters using conducting elements;  
Appl. Opt. **21** (1982) 2814 - 2816.
- /14/ V. P. Tomaselli, D. C. Edewaard, P. Gillan, K. D. Möller:  
Far-infrared bandpass filters from cross-shaped grids;  
Appl. Opt. **20** (1981) 1361 - 1366.
- /15/ P. A. Krug, D. H. Dawes, R. C. McPhedran, W. Wright, J. C. Macfarlane,  
L. B. Whitbourn:  
Annular-slot arrays as far-infrared bandpass filters;  
Opt. Lett. **14** (1989) 931-933.

- /16/ E. L. Pelton, B. A. Munk:  
Scattering from periodic arrays of crossed dipoles;  
IEEE Trans. **AP-27** (1979) 323 - 330.
- /17/ V. D. Agrawal, W. A. Imbriale:  
Design of a dichroic cassegrain subreflector;  
IEEE Trans. **AP-27** (1979) 466 - 473.
- /18/ R. C. Compton, J. C. Macfarlane, L. B. Whitbourn, M. M. Blanco:  
Babinet's principle applied to ideal beam-splitter for submillimetre waves;  
Opt. Acta **31** (1984) 515 - 524.
- /19/ R. C. Compton, L. B. Whitbourn, R. C. McPherdran:  
Strip gratings at dielectric interface and application of Babinet's principle;  
Appl. Opt. **23** (1984) 3226 - 3242.
- /20/ R. Ulrich:  
Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure;  
Infrared Phys. **7** (1967) 37 - 55.
- /21/ R. Ulrich:  
Effective low-pass filters for far infrared frequencies;  
Infrared Phys. **7** (1967) 65 - 74.
- /22/ N. Marcuvitz:  
Waveguide Handbook **10**;  
M.- I.- T.- Rad. Lab. Ser. (1951)280 - 285;  
McGraw-Hill, New York.
- /23/ R. Ulrich:  
Preparation of grids for far infrared filters;  
Appl. Opt. **8** (1969) 319 - 322.
- /24/ D. Maystre:  
Rigorous vector theories of diffraction gratings;  
E. Wolf (ed.): Progress in Optics **XXI** ;  
Elsevier Science Publisher B. V. Amsterdam (1984) 1-67.

- /25/ Chao-Chun Chen:  
Scattering by a two-dimensional periodic array of conducting plates;  
IEEE Trans. **AP-18** (1970) 660 - 665.
- /26/ Chao-Chun Chen:  
Transmission of microwave through perforated flat plates of finite  
thickness;  
IEEE Trans. **MTT-21**(1973) 1-6.
- /27/ McPhedran, R. C. Derrick, L. C. Botten:  
Theory of crossed gratings;  
R. Petit (ed.): Electromagnetic theory of gratings;  
Springer Berlin (1980) 227-276.
- /28/ J. A. Arnaud, F. A. Pelow:  
Resonant-grid quasi-optical diplexers;  
Bell Syst. Tech. J. **54** (1975) 263-283.
- /29/ K. F. Renk, L. Genzel:  
Interference filters and fabry-perot interferometers for the far  
infrared;  
Appl. Opt. **1** (1962) 643 - 648.
- /30/ J. E.- Davis:  
Bandpass interference filters for very far infrared astronomy;  
Infrared Phys. **20** (1980) 287 - 290.
- /31/ E. Kreysa, H. - P. Gemünd:  
persönliche Mitteilung;  
Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn (1990).
- /32/ A. Maner, W. Ehrfeld, R. Schwarz:  
Galvanoformung von Absorberstrukturen aus Gold auf Masken für die  
Röntgentiefenlithographie;  
Galvanotechnik **79** (1988) 1101-1106.

- /33/ W. K. Schomburg, W. Schelb, G. Stern:  
Verfahren zur Herstellung dünner Folien und Verwendung dieser zur  
Herstellung von Röntgenmasken;  
Patent P 39 20 7889, Anmeldung: 24. 06. 1989.
- /34/ S. Harsch, W. Ehrfeld, A. Maner:  
Untersuchungen zur Herstellung von Mikrostrukturen großer  
Strukturhöhe durch Galvanoformung in Nickelsulfamatelektrolyten;  
KfK-Bericht Nr. 4455 (1988), Dissertation: S. Harsch,  
Universität Karlsruhe (1988).
- /35/ F. Zuntini, G. Aliprandini, M. J. Gioria, A. Meyer:  
Elektrolysebad;  
Patent P 20 39 157, Offenlegung: 18. 02. 1971.
- /36/ H. Benninghoff:  
Fluoroboratbäder für die elektrolytische Abscheidung für dekorative  
und technische Zwecke;  
Galvanotechnik 57 (1966) 168-173.
- /37/ A. F. Bogenschütz, J. L. Jostan, H. Mietz:  
Untersuchungen zur Verringerung der Unterätzung beim alkalischen  
Ätzen von Kupfer;  
Metalloberfläche 10 (1982) 479-484.
- /38/ H. -D. Denner, T. Sutter:  
The vibration cryostat for space qualification tests;  
Estec contract No 7220/87/NL/MS (1989).
- /39/ H. -P. Gemünd:  
persönliche Mitteilung;  
Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn (1990).
- /40/ A. F. Holleman, E. Wiberg:  
Lehrbuch der anorganischen Chemie;  
Walter de Gruyter & Co., Berlin (1976) 851.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines vom Kernforschungszentrum Karlsruhe gewährten Doktorandenstipendiums und wurde am Institut für Mikrostrukturtechnik der Universität und des Kernforschungszentrums Karlsruhe durchgeführt.

Wir bedanken uns bei den Mitarbeitern des Instituts für Mikrostrukturtechnik, insbesondere bei denen aus den Abteilungen Physikalische Prozeßtechnik und Lithographie, Alternative Methoden der Mikrotechnik, der Gruppe Mikro-Galvanoformung, der Werkstatt und des Elektroniklabors für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit.

Außerdem danken wir den Mitarbeitern des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie, Bonn, der Firma MicroParts, Karlsruhe und des Bonner Synchrotrons für die freundliche Unterstützung, die wesentlich zur erfolgreichen Durchführung dieser Arbeit beigetragen hat.