

AUFLÖSUNGSTESTS MIT REIHENMESSKAMMERN AUS GROSSER FLUGHÖHE

M. Schroeder, Wessling

1. Einleitung

Im 1. Spacelabflug, dessen Start nach mehrmaliger Verschiebung jetzt für April 1982 geplant ist, soll eine Kamera vom Typ RMK A 30/23 eingesetzt werden. Offen ist bis jetzt noch, welche Filme und Filter dabei verwendet werden sollen. Um die anstehende Entscheidung auf der Grundlage von experimentellen Daten treffen zu können, wurde beschlossen, Luftbildflüge mit verschiedenen Film/Filter-Kombinationen aus möglichst großer Flughöhe durchzuführen.

Da für zukünftige Spacelabflüge auch der Einsatz langbrennweitiger Kammer in Erwägung gezogen wird, wurde neben der RMK A 30/23 auch gleichzeitig eine RMK A 60/23 verwendet. Die Versuche dienten deshalb auch zum Vergleich der Leistungsfähigkeit von RMK A 30/23 und RMK A 60/23.

Die Luftbildflüge wurden mit zwei Flugzeugen gemeinsam vom Institut National Géographique (IGN) und der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) über einem Gelände in der Nähe von Villefranche s. Cher, Frankreich, im September 1978 durchgeführt [1]. In der Mitte des Flugstreifens war ein schwarz/weißes Balkenmuster ausgelegt, mit dessen Hilfe das Auflösungsvermögen ermittelt wurde.

Die Auswertung des gewonnenen Bildmaterials wird unabhängig von vier Gruppen nach unterschiedlichen Methoden vorgenommen (Tabelle 1):

IGN, Paris	Photointerpretative Bewertung
Institut f. Photogrammetrie Polytechnische Hochschule, Milano	Photogrammetrische Einstellgenauigkeit
Institut f. Angewandte Geodäsie, Frankfurt	MTF-Bestimmung an natürlichen Kanten
DFVLR, Oberpfaffenhofen Institut f. Photogrammetrie, TU-Hannover	Mikroskopische Auswertung des Testmusters

Tabelle 1 An der Auswertung beteiligte Gruppen und zugehörige Aufgaben

Dieser Bericht behandelt ausschließlich die mikroskopische Bestimmung des Auflösungsvermögens anhand des Testmusters.

Die Auswahl der Filme und Filter für den Spacelabflug erfolgt nachdem die Auswertergebnisse aller vier Gruppen vorliegen.

2. Durchführung der Versuche

Luftbildflüge

Die Flüge wurden mit zwei Flugzeugen vom Typ Falcon 20 durchgeführt. In einem befand sich die RMK 30/23, im anderen die RMK 60/23. Die Kameras waren in den Druckkabinen der Flugzeuge vor Photofenstern hoher optischer Qualität, durch die hindurch photographiert wurde, montiert. Die Transmission der Photofenster betrug im Sichtbaren und nahem Infrarot $\sim 90\%$.

Die Bildflüge, bei denen beide Flugzeuge in wenigen Metern Abstand parallel nebeneinander flogen, verliefen jeweils in Richtung Süd-Nord. Der Flugstreifen hatte eine Länge von ca. 30 km und erfaßte land- und forstwirtschaftliches Gebiet, sowie die Stadt Romorantin. Zur genauen Navigation entlang des Flugstreifens, in dessen Mitte das Testmuster lag, wurde ein Navigationsteleskop benutzt. Die Flüge erfolgten aus ca. 10.5 km Höhe und in einigen wenigen Fällen auch aus 7 km Höhe jeweils mit einer Geschwindigkeit von $720 \text{ km/sec} = 200 \text{ m/sec}$. Die Flüge aus 7 km Höhe wurden durchgeführt, um das gleiche v/h-Verhältnis von 0.03 sec^{-1} wie bei Spacelab zu erzielen.

Filme	Zeiss Filter
1.) EK 2402 - Plus X Aerographic	B,D
2.) EK 2402 - Plus X, (French)	D
3.) EK 2405 - Double X Aerographic	B,D
4.) Agfa AVIPHOT PAN 30 PE	B,D
5.) EK 3411 Plus X Aerocon	B
*6.) EK 3414 High Definition Aerial	--
*7.) EK 2476 Linagraph Shell Burst	D,H
*8.) EK 2645 Plus - X, (British)	D
9.) EK 2424 Infrared Aerographic	H,D
10.) EK 2445 Aerocolor Negativ	-,KL
11.) EK 2448 Aerochrome MS	-,KL
12.) EK S0 - 397 Ektachrome EF Aerographic	-,KL
13.) EK 2443 Aerochrome Infrared	D
*14.) EK S0 - 131 High Definition Aerochrome Infr.	--

Tabelle 2 Verwendete Filme und Filter

Filter	Cut-off Wellenlänge
KL	Klarglas
B	480 μm
D	535 μm
H	635 μm

Tabelle 3 Cut-off Wellenlänge der verwendeten Zeiss-Filter für 50 % Transmittanz

Die in Tabelle 2 und 3 angegebenen Filme und Filter wurden verwendet. Die mit * in Tabelle 2 gekennzeichneten Filme waren ursprünglich nicht zum Test vorgesehen, da sie für einen Einsatz in Spacelab nicht in Frage zu kommen schienen. Sie wurden aber dennoch verwendet, weil sie zufällig zur Verfügung standen. Die Belichtung der Filme erfolgte in der Mehrzahl mit kurzen Verschlusszeiten von 1/500 sec und 1/1000 sec, da die gleich kurzen Belichtungszeiten zur Vermeidung von Bewegungsunschärfe auch im Spacelab verwendet werden sollen. Nur bei den sehr unempfindlichen Filmen 3414 und 50-131 wurden längere Belichtungszeiten genommen.

Die Flüge wurden bei zwei verschiedenen Sonnenständen, nämlich bei den Sonnenelevationen $h \sim 25^\circ$ und $h \sim 45^\circ$ durchgeführt. Insgesamt erfolgten 44 Flüge. Eine Übersicht über sämtliche durchgeführten Flüge, bei denen ca. 2000 Aufnahmen gewonnen wurden, ist im Anhang 1 gegeben [1].

Die Filmentwicklung wurde sensitometrisch kontrolliert indem für jeden Film das Gamma (γ) mit Hilfe eines aufbelichteten Graukeils bestimmt wurde. Das jeweilige Gamma ist in den Tabellen 7 und 8 im Anhang 2 angegeben.

Atmosphärische Bedingungen

Die Meßflüge erstreckten sich über einen Zeitraum von 7 Tagen, von denen 6 Tage für Luftbildflüge aus großen Höhen geeignet waren. Es herrschte während dieser Zeit Hochdruckwetterlage mit geringer Trübung der Atmosphäre.

Zum Vergleich von Luftbilddaufnahmen, die an verschiedenen Tagen gewonnen wurden, müssen die jeweiligen atmosphärischen Bedingungen berücksichtigt werden. Um ein quantitatives Maß für die atmosphärischen Bedingungen zu erhalten, wurden in unmittelbarer Nähe des Testmusters radiometrische Messungen der einfallenden Strahlung durchgeführt, die zur Dokumentation der Einstrahlungsverhältnisse und des optischen Zustandes der Atmosphäre dienen.

Mit einem Pyranometer (Eppley PSP) wurde die einfallende Gesamtstrahlung im Wellenlängenbereich $0.3 - 2.8 \mu\text{m}$ gemessen. Die über den Tag aufgezeichneten Meßwerte sind in Abbildung 1 für die verschiedenen Tage aufgetragen.

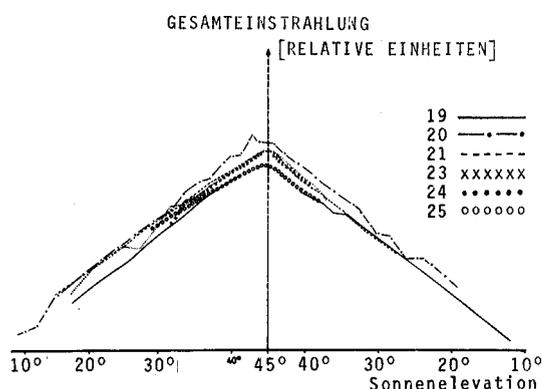


Abb. 1 Einfallende Strahlung an den Meßtagen 19., 20., 21., 23., 24. und 25. September 1978

TAG	TRANS - MISSION	r ²	MEßZEIT [GMT]	ANZAHL d. MEßpunkte
19, 9, 78	0,70	0,98	8,15 - 16,00	8
20, 9, 78	0,68	0,97	8,30 - 14,40	5
21, 9, 78	0,73	0,98	7,55 - 19,10	9
22, 9, 78	-	-	-	-
23, 9, 78	0,59*	0,80	10,35 - 13,40	4
24, 9, 78	0,72	0,99	8,35 - 12,05	7
25, 9, 78	0,74	0,95	9,20 - 12,55	6

Tabelle 4 Transmission der Atmosphäre bei der Wellenlänge $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$
 (* wahrscheinlicher Meßfehler)

Des weiteren wurde mit einem Spektralradiometer (Barnes 12-550) die Transmission der Gesamtatmosphäre bei der Wellenlänge $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ gemessen. Die Transmission ist ein Maß für den Dunstgehalt und die vertikale Sicht. Die Ergebnisse gibt Tabelle 4 wieder.

Abbildung 1 und Tabelle 4 zeigen, daß Beleuchtung und vertikale Sicht während der Meßperiode nahezu konstant geblieben sind.

Das Testmuster

Das Testmuster besteht aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe und enthält weiße Balken auf schwarzem Untergrund. Die Anordnung des Testmusters zeigen Abbildung 2 und 3. Die Abmessung der Balken enthält Tabelle 5.

Abstufung der Balkenbreite:	$\sqrt[3]{2} = 1.26$
Breite/Länge :	1 : 5
Breite der Balken :	No. 1 = 2.00 m
	No. 2 = 1.59 m
	No. 3 = 1.26 m
	No. 4 = 1.00 m
	No. 5 = 0.79 m
	No. 6 = 0.63 m
	No. 7 = 0.50 m
	No. 8 = 0.40 m
	No. 9 = 0.315 m
	No. 10 = 0.25 m
	No. 11 = 0.20 m
	No. 12 = 0.16 m

Tabelle 5 Abmessungen des Balkenmusters

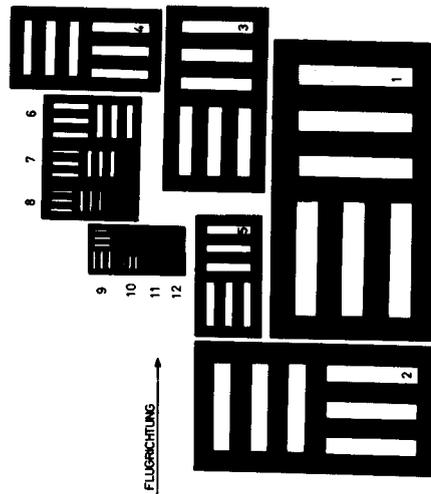


Abb. 2 Anordnung des am Boden ausgelegten Testmusters

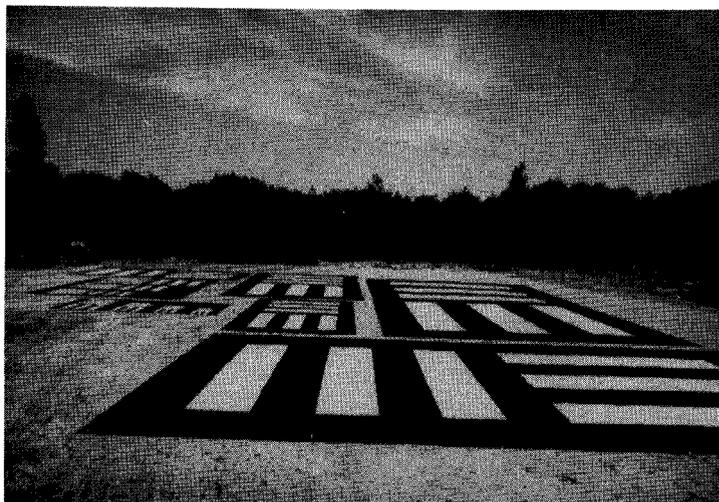


Abb. 3 Aufnahme des am Boden ausgelegten Testmusters

Das Reflexionsverhalten der Testmuster wurde mit einem Spektralradiometer in den Wellenlängenbereichen

$$\Delta \lambda_1 = 0.5 - 0.6 \mu\text{m} \text{ und}$$

$$\Delta \lambda_2 = 0.6 - 0.7 \mu\text{m} \text{ gemessen.}$$

Diese beiden Spektralbereiche umfassen zusammen gerade den Empfindlichkeitsbereich von s/w-Filmen, die mit einem Gelbfilter belichtet wurden. Als Reflexionsfaktor wurde für beide Spektralbereiche gefunden:

$$\text{schwarz: } r_s = 0.02$$

$$\text{weiß : } r_w = 0.90$$

Damit ergibt sich ein Kontrast der weißen zu schwarzen Balken von

$$K = \frac{I_{\text{Max}}}{I_{\text{Min}}} = 45 : 1$$

bzw. ein logarithmischer Kontrast von

$$D = \log \frac{I_{\text{Max}}}{I_{\text{Min}}} = 1.65 : 1$$

Durch den Einfluß der Atmosphäre ergibt sich eine Kontrastabschwächung, die mit einem vereinfachten Strahlungsmodell der Atmosphäre abgeschätzt wurde. Einzelheiten dieses Modells sind [2] zu entnehmen. Als experimentelle Meßgröße wird in diesem Modell die Transmission der Atmosphäre benutzt, die für den Bereich $\Delta \lambda_1 = 0.5 - 0.6 \mu\text{m}$ mit 0.72 gemessen wurde. Weiter ist bei diesen Überlegungen die zwischen Objekt und Kamera liegende relative Luftmasse zu berücksichtigen. Setzt man eine US-Standard Atmosphäre voraus, so ergibt sich die in Abbildung 4 wiedergegebene Beziehung zwischen relativer Luftmasse und Höhe. Es zeigt sich, daß sich im Bereich bis 10.5 km Höhe ca. 76 % der gesamten Luftmasse befindet.

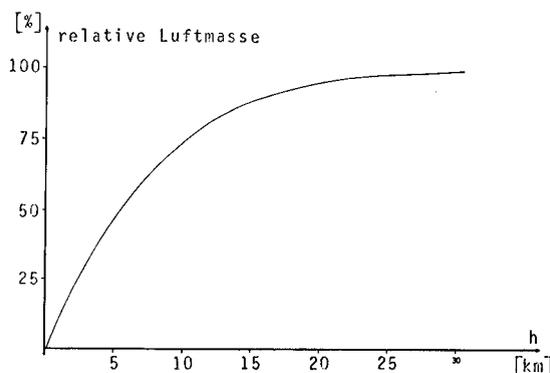


Abb. 4 Relative Luftmasse in Abhängigkeit von der Höhe

Die am Ort der Kamera ankommenden Strahlungssignale ergeben sich zu:

$$\text{weiß} : H_w = H_i r_w T_H + H_{LH}$$

$$\text{schwarz} : H_s = H_i r_s T_H + H_{LH}$$

mit

- H_i = am Boden (Objekt) einfallende Strahlung
- T_H = Transmission der Atmosphärenschicht der Höhe H
- T_∞ = Transmission der Gesamtatmosphäre
- T_{LH} = Luftlicht in der Höhe H
- $H_{L\infty}$ = Luftlicht der Gesamtatmosphäre

Unter Annahme eines Sonnenstandes von $h = 45^\circ$ und $h = 25^\circ$ ergeben sich folgende Werte:

$h = 45^\circ$	T_∞	$T_{10.5}$	T_7	H_i	$H_{L\infty}$	$H_{L10.5}$	H_{L7}	[mW/cm ²]
$\Delta\lambda_1 = 0.5 - 0.6 \mu\text{m}$	0.72	0.78	0.82	10.94	2.50	1.90	1.49	
$\Delta\lambda_2 = 0.6 - 0.7 \mu\text{m}$	0.79	0.83	0.87	9.73	1.62	1.23	0.96	
<hr/>								
$h = 25^\circ$	T_∞	$T_{10.5}$	T_7	H_i	$H_{L\infty}$	$H_{L10.5}$	H_{L7}	[mW/cm ²]
$\Delta\lambda_1 = 0.5 - 0.6 \mu\text{m}$	0.72	0.78	0.82	6.02	2.33	1.69	1.04	
$\Delta\lambda_2 = 0.6 - 0.7 \mu\text{m}$	0.79	0.83	0.87	5.36	1.49	1.13	0.67	

Damit ergeben sich die in Tabelle 6 angegebenen Kontraste:

H [km]	$K = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$		$\Delta D = \log \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$	
	$h = 45^\circ$	$h = 25^\circ$	$h = 45^\circ$	$h = 25^\circ$
0,0	45,0	45,0	1,65	1,65
7,0	6,5	5,5	0,8	0,7
10,5	5,0	3,5		
∞	4,0	3,0	0,6	0,5

Tabelle 6 Abhängigkeit des Kontrastes von Flughöhe und Sonnenstand

3. Auswertung und Ergebnisse

Methode

Die Aufnahmen wurden mit 80 % bis 85 % Überlappung in Flugrichtung gewonnen, so daß auf 5 bis 6 aufeinanderfolgenden Aufnahmen das Testmuster unter verschiedenen Sichtwinkeln abgebildet ist.

In der Mehrzahl der Fälle lagen die abgebildeten Testmuster in einem Abstand von ± 25 mm von der Bildmittellinie (Abbildung 5).

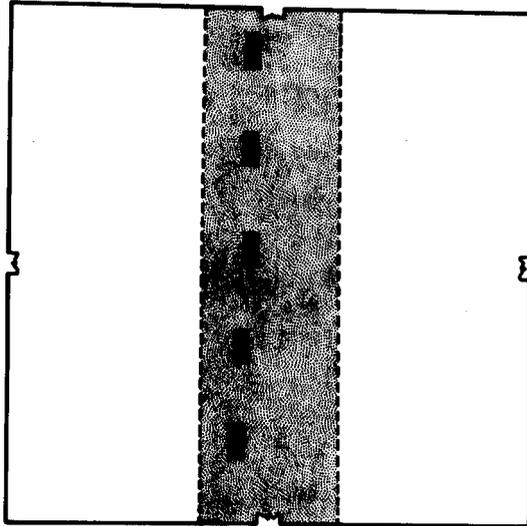


Abb. 5 Beispiel für die Lage der Testmuster in den Bildern einer Aufnahmeserie. Der schraffierte Streifen gibt den Bereich an, in dem in der Mehrzahl der Fälle die Testmuster zu finden waren

Bei drei Flügen mit dem Film 2402 wurden die Kameras um 40° gegenüber der Flugrichtung gedreht, so daß in diesen Fällen die Lage der Testmuster im Bild durch Abbildung 6 wiedergegeben wird.

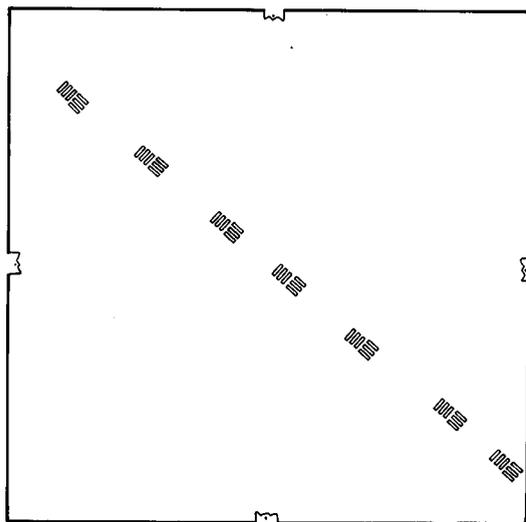


Abb. 6 Lage der Testmuster bei Flügen mit "gedrifteter" Kamera

Das auf dem Film abgebildete Balkenmuster wurde auf einem Leuchttisch mit dem Zoom-Stereomikroskop III der Fa. Zeiss betrachtet. Die Vergrößerung wurde so eingestellt, daß jeweils maximale Auflösung erreicht wurde und lag zwischen 16- und 40-fach. Als noch aufgelöst wurde diejenige 3-Balken-Testfigur angesehen, bei der die Richtung der Balken noch erkennbar war. Die Auswertung wurde von 3 Betrachtern unabhängig voneinander durchgeführt und als Wert für die radiale und tangentiale Auflösung das Mittel aus den drei Beobachtungen angesehen. Der Auflösungswert wurde wie üblich als geometrisches Mittel zwischen radialer und tangentialer Auflösung berechnet.

$$R = \sqrt{R_r R_t}$$

R = Auflösung in lp/mm

R_r = radiale Auflösung in lp/mm

R_t = tangentiale Auflösung in lp/mm

Um das generelle Auflösungsverhalten der Kammer zu ermitteln, wurde das Auflösungsvermögen in Abhängigkeit vom Abstand vom Bildmittelpunkt (r) aufgetragen (Abbildung 7).

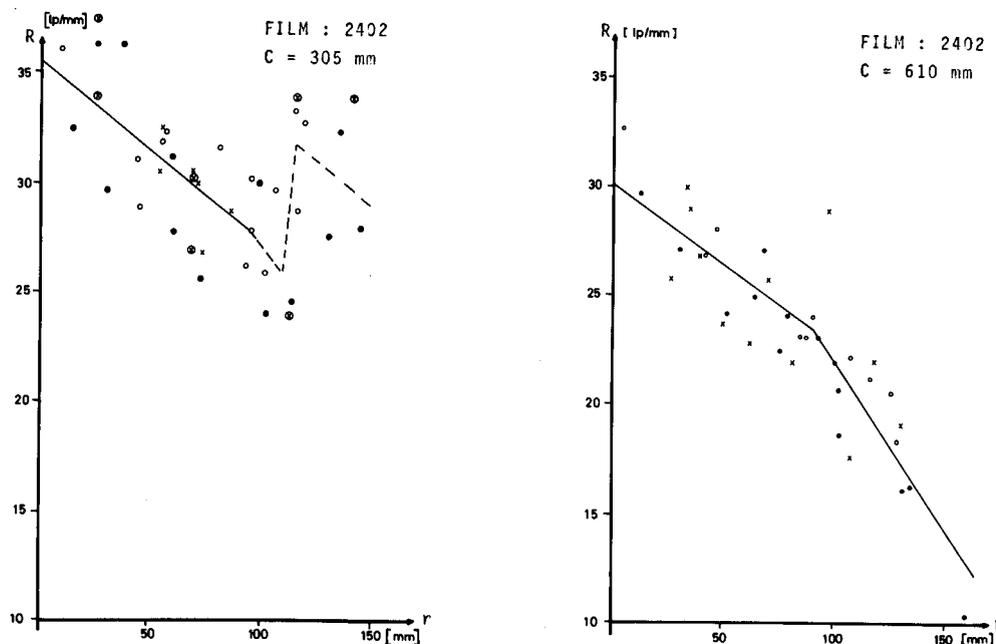


Abb. 7 Auflösungsvermögen von RMK 30/23 RMK 60/23 auf 2402-Film

Um genügend Meßpunkte zu erhalten und um Tendenzen zu erkennen, sind die Auflösungsweite mit dem 2402-Film aufgetragen, da mit diesem Film die meisten Aufnahmen gewonnen wurden. Die Meßpunkte streuen stark und es ist nicht ohne weiteres möglich, einen funktionalen Zusammenhang herzustellen. Bis $r = 100$ mm ist jedoch bei beiden Kammer ein mehr oder weniger stetiges lineares Abnehmen des Auflösungsvermögens zu erkennen. In diesem Bereich wird deshalb das Auflösungsvermögen durch eine Gerade beschrieben. In Abständen $r > 100$ mm scheint das Auflösungsvermögen der RMK A 30/23 wieder anzusteigen oder konstant zu bleiben, während es für die RMK A 60/23 stark abfällt.

Ähnliche Tendenzen, die die gefundene lineare Abhängigkeit bestätigen, erhält man auch, wenn man die vom Kamerahersteller unter Laborbedingungen auf Aviphot PAN 30 gewonnenen Auflösungsweite aufträgt (Abbildung 8).

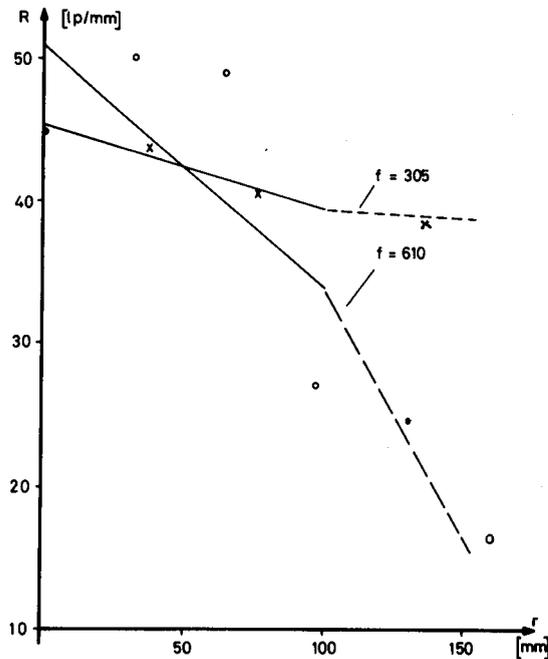


Abb. 8 Vom Kamerahersteller angegebenes Auflösungsvermögen auf Aviphot PAN 30-Film

Unter Annahme, daß das Auflösungsvermögen bis $r \approx 100$ mm durch eine Gerade beschrieben werden kann, wurde diese Gerade für die verschiedenen Aufnahmeserien mittels linearer Regression bestimmt. Die auf diese Weise berechneten Werte für das Auflösungsvermögen in der Bildmitte (R_0) und die Steigung der Geraden (m) sind in Tabellen 7 und 8 (Spalte 10 und 11) des Anhanges 2 enthalten.

Bei der Beurteilung des Auflösungsvermögens steht man vor der Frage, wie das R_0 und das m zu bewerten sind, z.B. welchem der beiden Filme in Abbildung 9 soll man die höhere Auflösung zuschreiben ?

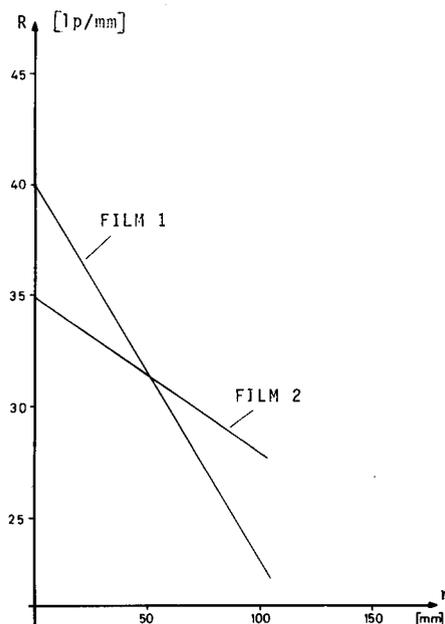


Abb. 9 Typischer Verlauf des Auflösungsvermögens von zwei Filmen
 Schroeder 10

Um diese Schwierigkeit zu umgehen, wurde für den Bildbereich mit $r \leq 100$ mm (Abbildung 10) die Area Weighted Average Resolution ($AWAR_{100}$) gebildet.

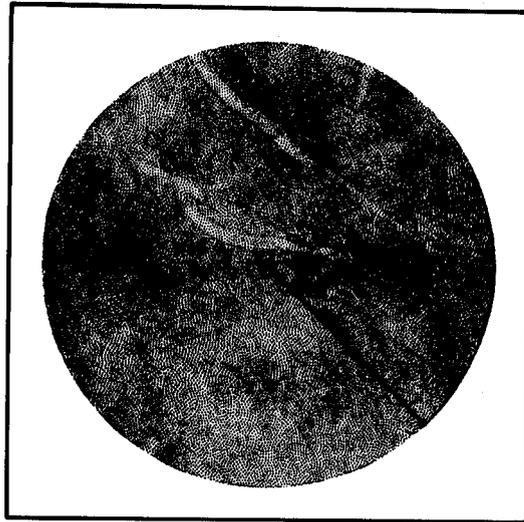


Abb. 10 Bildbereich für den $AWAR_{100}$ gebildet wurde

Die AWAR ergibt sich bei linearem Abfall des Auflösungsvermögens zu

$$AWAR = R_0 + \frac{2}{3} m r_0$$

mit R_0 = Auflösungsvermögen in Bildmitte
 m = Steigung der Auflösungsgeraden
 r_0 = 100 mm

Der AWAR-Wert für die verschiedenen Bildserien ist in Tabelle 7 und 8 im Anhang 2 (Spalte 12) angegeben.

Vergleich RMK A 30/23 und RMK A 60/23

Zum Vergleich der beiden Kamern sind in Abbildung 11 noch einmal die auf Aviphot PAN 30-Film gefundenen Auflösungskurven dargestellt. Dabei wurde über alle auf Aviphot PAN 30-Film aufgezeichneten Meßpunkte gemittelt. Es wird die gleiche Tendenz wie bei Abbildung 7 und 8 gefunden.

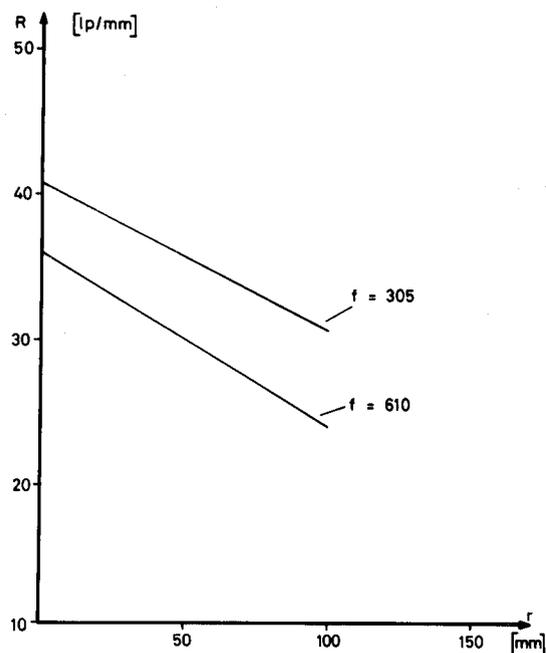


Abb. 11 Auflösungsverhalten von RMK A 30/23 und RMK A 60/23 auf Aviphot PAN 30-Film

Aus Abbildung 7 und 11 ergibt sich das folgende Verhältnis der Grundauf-
 lösung der beiden Kamern (Tabelle 9):

	$r = 0$	$r = 100 \text{ mm}$	$r \sim 140 \text{ mm}$
RMK A 60/23	1.7 : 1	1.6 : 1	1.1 : 1
RMK A 30/23			

Tabelle 9 Verhältnis der Grundaufösungen von RMK A 60/23 und RMK A 30/23

Die Verhältnisse schwanken zwar etwas von Film zu Film, mittelt man aber über alle verwendeten Filmtypen, so ergeben sich die in Tabelle 9 angegebenen Werte. Es zeigt sich, daß bei Verwendung einer RMK A 60/23 keinesfalls mit einer Verdoppelung der Grundauflösung gerechnet werden kann.

Bewegungsschärfe

Die Bildwanderung sollte sich rein theoretisch in einer Herabsetzung des tangentialen Auflösungsvermögens auswirken und es wäre zu erwarten, daß das radiale Auflösungsvermögen in der Mehrzahl der untersuchten Fälle größer als das tangentiale ist.

Tabelle 10 gibt den tatsächlich gefundenen Sachverhalt wieder:

C	305	305	610	610	305/610
ΔS	5 - 7 μm	10 - 14 μm	10 - 14 μm	20 - 30 μm	> 40 μm
$R_r = R_t$	33 %	56 %	34 %	39 %	-
$R_r > R_t$	24 %	27 %	23 %	45 %	100 %
$R_r < R_t$	43 %	17 %	43 %	16 %	-
Anzahl der Fälle	103	41	126	38	25

Tabelle 10 Vergleich zwischen radialem (R_r) und tangenialem (R_t) Auflösungsvermögen für unterschiedliche Werte der Bildwanderung Δs

Das Ansteigen der radialen - gegenüber der tangentialen Auflösung beginnt sich bei Bildwanderungen ab 20 μm für die RMK A 60/23 bemerkbar zu machen, ist bis 14 μm bei der RMK A 30/23 wenig ausgeprägt und tritt deutlich bei größerer Bildwanderung für beide Kammer hervorkommen. Bei Bildwanderungen bis 7 μm bei der RMK A 30/23 und bis 14 μm bei der RMK A 60/23 ist sogar die tangentiale Auflösung häufig größer als die radiale. Ein Einfluß der Bildwanderung scheint sich danach im Bereich unter 20 μm wenig bemerkbar zu machen.

Der Einfluß der Bildwanderung soll am Beispiel des High Definition Films 3414 veranschaulicht werden (Abbildung 12). In beiden Fällen erreicht die tangentiale Auflösung ziemlich genau den Wert, den die Theorie voraussagt.

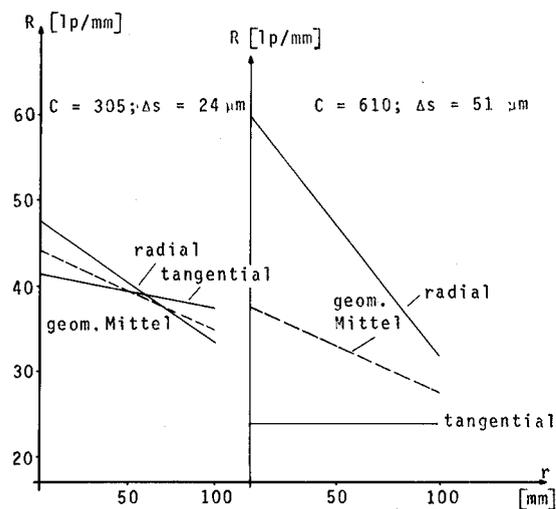


Abb. 12 Einfluß der Bildwanderung auf das tangentiale Auflösungsvermögen am Beispiel des High Definition Films 3414

RMK 30/23				RMK 60/23			
	FILM	FILTER	AWAR ₁₀₀	R ₀	FILTER	AWAR ₁₀₀	R ₀
1.)	2476	H	41	58	D	32	53
2.)	2645	D	35	51	D	29	36
	3414	-	38	44	-	31	38
3.)	3411	B	34	43	B	25	30
	2405	B	33	40	B	29	34
4.)	2405	D	33	42	D	27	32
	AP 30	B	35	39	B	27	34
	AP 30	D	33	39	D	29	36
	2402	B	30	36	B	26	32
	2402	D	31	38	D	28	31
	2402	-	30	39	-	-	-
	2402 F	D	30	36	D	25	30
	2424	H			D	20	32
	SO - 397	-	31	40	KL	26	26
	2445	-	30	36	KL	24	24
	2448	-	29	31	KL	25	25
5.)	2443	D	29	33	D	22	29
	SO - 131	-	25	28	-	19	25

Tabelle 11 Auflösungsvermögen von RMK A 30/23 und RMK A 60/23.
 AWAR₁₀₀: Aera Weighted Average Resolution im Bildbereich bis r = 100 mm in lp/mm
 R₀ : Auflösung in Bildmitte in lp/mm

Bewertung

Die meisten Flüge wurden mit dem 2402-Plus X-Film und dem Aviphot PAN 30-Film durchgeführt. Die gefundenen Auflösungswerte für die einzelnen Bildflüge lagen relativ nahe beieinander, so daß kein signifikanter Einfluß von Filtertyp, Flughöhe (7 oder 10.5 km) und Sonnenstand, - also alle Faktoren, die den Objektkontrast beeinflussen -, zu beobachten war (Tabelle 7 und 8, Anhang 2). Als Auflösungswert wurde in diesen Fällen der Mittelwert aus mehreren Flügen gebildet. Allein beim Farb-IR-Film 2443 ergaben sich für die Flüge aus 7 km eindeutig höhere Auflösungswerte gegenüber den Flügen aus 10.5 km. Hier scheint sich die Kontraständerung bemerkbar gemacht zu haben. Deshalb wurden für die Auswertung nur die Aufnahmen aus 10.5 km Höhe berücksichtigt. Die gefundenen Auflösungswerte sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Die in Tabelle 11 mit 1.) bis 5.) gekennzeichneten Filme scheinen aufgrund ihrer Auflösung und ihrer Empfindlichkeit für einen Spacelab-Einsatz in Frage zu kommen und sollen in weiteren Testflügen eingehender untersucht werden.

Der Plus X-2402-Film scheidet aufgrund der niedrigen Auflösung aus. Der 3414-High Definition Film erzielt zwar eine hohe Auflösung, ist aber aufgrund seiner geringen Empfindlichkeit nur bei Sonnenständen von $h > 40^\circ$ zu gebrauchen, bei niedrigen Sonnenständen dürften die notwendig werdenden längeren Belichtungszeiten zu merklicher Bewegungsunschärfe führen.

Die Filme 2405-Double X und Aviphot PAN 30 zeigen zwar hinsichtlich der Auflösung gleich gute Resultate, trotzdem dürfte der Double-X aufgrund seiner höheren Empfindlichkeit für den Spacelab-Einsatz geeigneter sein.

Die Farbfilme zeigen hinsichtlich der Auflösung keine deutlichen Unterschiede. Nur der SO-131 fällt deutlich ab; dies ist durch die Bewegungsunschärfe aufgrund der relativ langen Belichtungszeiten zu erklären.

Allerdings zeigen die Filme SO-397, 2448 und 2445 bedingt durch Atmosphären- einfluß nur sehr schwache Farbunterschiede, die sich bei Aufnahmen aus dem Weltraum noch weiter abschwächen dürften. Daher erscheint für den Weltraum- eininsatz der IR-Farbfilm 2443 der geeigneteren zu sein, insbesondere für die thematische Auswertung.

Es ist zu beachten, daß die Filme 2476, 2645 und 3411 mit relativ hoher Auflösung bei Blende 8 gewonnen wurden, während die meisten anderen Aufnahmen mit Blende 5.6 belichtet wurden. Es ist anzunehmen, daß die Linse bei Blende 8 eine höhere Auflösung als bei 5.6 besitzt und dies sich z.T. in den höheren Auflösungswerten niederschlägt. Da festgestellt wurde, daß sich Bildwanderungen bis ca. 20 μm nicht deutlich auswirken, kann angenommen werden, daß im Mittel mit Blende 8 und $t = 1/500$ sec höhere Auflösungswerte erzielt werden als mit Blende 5.6 und $t = 1/1000$ sec. Dies müßte bei nachfolgenden Untersuchungen geprüft werden.

Bei den Filmen, die mit Filter B und D eingesetzt wurden, ergab sich kein wesentlicher Unterschied, jedoch wurden bei zwei Filmen (2476, 2645) mit hoher Auflösung das Filter D verwendet. Im Hinblick auf Spacelab erscheint ein D-Filter das geeigneteren für die s/w-Filme zu sein.

4. Literatur

- [1] DFVLR/GDTA: Opération aéroportée combinée
Septembre 1978. Simulation Spacelab.
- [2] G. KRITIKOS, M. SCHROEDER: Berechnung des spektralen Reflexions-
grades natürlicher Oberflächen aus ERTS-Aufnahmen. Raumfahrt-
forschung, Heft 3, Mai/Juni 1975.

Anhang 1

DATE & TYPE N° VOL & AXE	ALTITUDE	CAP	V Kts	Drift	Temp.	EMISSION	HEURE TU		RMK 305mm		RMK 610mm		METEO / OBSERVATION
							DEBIT	CIBIE	FIN	Nb Cl	Speed	f.	
le 19/09/78 Type II.4 DM	7 010m	013	315	+7	-23°	2402	14.24.50	14.26.00	21	B	1/1000	5,6	2/8 Ci + brume
	7 010m	013	315	+7	-23°	AVIPIHOT	14.38.00	14.39.15	22	B	1/500	5,6	1/8 Ci + brume
	10 350m	013	385	+7		AVIPIHOT	14.56.45	14.57.55	18	B	1/500	5,6	Brume
	10 350m	013	385	+7		3411	15.12.35	15.13.50	17	B	1/500	9,0	1/8 StCu
	10 350m	013	385	+7		2405	15.21.05	15.22.20	17	B	1/1000	11,0	Clair
	10 350m	013	385	+7		2402	15.32.00	15.33.50	17	B	1/1000	5,6	Clair
	10 350m	013	380	+7		2402	15.44.10	15.45.25	20	B	1/1000	5,6	Soleil bas à horiz.
	10 350m	013	385	+7		2402	15.56.25	15.57.40	18	B	1/1000	5,6	-id-
	10 650m	021	355	-1	-49°	2445	11.23.30	11.24.55	20	NF	1/1000	8,0	Ciel clair
	10 650m	021	355	-1	-49°	SO 397	11.36.20	11.37.40	18	NF	1/1000	8,0	Ciel clair
le 20/09/78 Type III.2	10 650m	021	355	-1	-49°	2448	11.52.55	11.54.10	15	NF	1/1000	5,6	Pb magasin sur 305mm
	10 650m	021	355	-1-40°	-49°	2402 Drift	12.04.35	12.06.00	19	NF	1/1000	8,0	Ciel clair
	10 650m	022	350	-2	-49°	2448	15.20.15	15.21.35	17	NF	1/500	5,6	Brume légère
	10 650m	022	350	-2	-49°	SO 397	15.32.55	15.34.15	18	NF	1/1000	5,6	Brume légère
	10 650m	022	355	-2	-49°	2445	15.45.45	15.47.00	17	NF	1/1000	5,6	Ciel clair
le 21/09/78 Type III.4 DM	10 500m	020	375	+0	-53°	2402	08.27.45	08.28.30	7	B	1/500	5,6	recouvrement 60%
	11 100m	018	380	+2	-53°	2402	08.50.15	08.51.15	8	B	1/500	5,6	Ciel clair
	11 100m	019	390	+1	-53°	2402	09.02.30	09.03.30	8	B	1/500	5,6	Ciel clair
	11 100m	019	390	+1	-53°	2402	09.14.35	09.15.25	8	B	1/500	5,6	Ciel clair
	11 100m	019	395	+1	-53°	2402	09.27.35	09.28.35	7	B	1/500	5,6	-id- givrage glace
Type I.2	7 050m	019	310	+1	-22°	2402	12.18.25	12.19.50	25	D	1/1000	5,6	Ciel clair
	7 050m	018	310	+2	-22°	2443	12.31.30	12.32.55	25	D	1/1000	5,6	Ciel clair
	10 150m	019	355	+1	-48°	2443	12.54.30	12.55.40	17	D	1/1000	5,6	Ciel clair
	10 400m	018	390	+2	-49°	2405	13.07.45	13.09.00	18	D	1/1000	11,0	Ciel clair
	10 400m	019	390	+1	-49°	AVIPIHOT	13.20.40	13.21.50	17	D	1/500	5,6	Ciel clair
	10 400m	019	390	+1	-49°	2402	13.33.20	13.34.25	17	D	1/1000	5,6	Ciel clair
	10 400m	019	390	+1	-49°	2402	13.47.05	13.48.00	16	D	1/1000	5,6	Ciel clair
	F4, F2 et F5 non réalisés pour cause d'activation de la zone par les militaires.												

Anhang 1

DATE & TYPE N° VOL & AXE	ALTITUDE	CAP	V Kts	Orif. Temp.	EMULSION	HEURE TU		RMK 305mm		RMK 610mm		METEO / OBSERVATION
						DEBUT	FIN	Nb	Speed	Nb	Speed	
Le 23/09/78 Type II 2	7 150m	013	325	+5	2402	11.26.50	11.29.20	B	1/1000	B	1/1000	3/8 Ci supérieurs
	7 150m	013	325	+5	AVIPROT	11.39.50	11.41.20	B	1/500	B	1/500	3/8 Ci supérieurs
	10 700m	013	390	+5	AVIPROT	11.59.00	12.01.50	B	1/500	B	1/500	Ciel clair
	10 700m	013	405	+5	3411	12.11.30	12.12.35	B	1/1000	B	1/1000	Ciel clair
	10 700m	013	405	+5	2405	12.24.10	12.25.00	B	1/1000	B	1/1000	Ciel clair
	10 700m	013	410	+6	2402	12.36.50	12.37.40	B	1/1000	B	1/1000	Ciel clair
Le 24/09/78 Type IV 2	10 800m	019	445	+0	2424	11.17.55	11.18.50	H	1/1000	H	1/1000	Ciel clair
	10 800m	018	445	+0	2476	11.30.25	11.31.15	H	1/1000	H	1/1000	Ciel clair
	10 800m	018	440	+0	3414	11.43.20	11.44.10	NF	1/250	NF	1/250	Ciel clair
Le 25/09/78 Type V 2	10 700m	015	445	+3	S0 131	11.34.05	11.34.55	NF	1/150	NF	1/150	Ciel clair
	10 700m	014	410	+4	S0 131	11.46.40	11.48.30	NF	1/100	NF	1/100	Ciel clair
	10 700m	013	445	+4	2645	12.00.20	12.01.10	D	1/1000	D	1/1000	Ciel clair
	10 700m	019	445	+4+30	2402 F	12.12.55	12.13.45	D	1/1000	D	1/1000	Ciel clair
	10 700m	016	445	+4	2402 F	12.25.10	12.26.10	D	1/1000	D	1/1000	Ciel clair
	10 700m	015	445	+4	2402 F	12.37.05	12.38.00	D	1/1000	D	1/1000	Ciel clair
	10 700m	016	450	+4	2402 F	12.50.05	12.51.05	D	1/1000	D	1/1000	-id- début girvage
							12.52.15					

Anhang 2

Film	Höhe [km]	Flug Nr.	Filter	t [sec]	Blende	Sonnen-elevation	Film- γ	ΔS [μm]	Ro [lp/mm]	m [lp/mm ²]	AWAR ₁₀₀ [lp/mm]
2402	10.35	1.6/1.7/1.8	B	1/1000	5.6	20°	2.15	6	35.2	-0.07	30.5
2402	10.40	5.6	D	1/1000	5.6	39°	1.60	6	40.3	-0.17	29.0
2402	10.65	2.4	-	1/1000	8.0	45°	1.70	5	38.4	-0.11	31.1
2402	10.65	3.4	-	1/1000	5.6	19°	1.70	5	33.7	-0.09	27.7
2402	10.50	4.1/4.2/4.3	B	1/500	5.6	30°	1.60	11	37.4	-0.11	30.1
2402	7.01	1.1	B	1/1000	5.6	32°	2.15	7	36.5	-0.10	29.8
2402	7.05	5.1	D	1/1000	5.6	43°	1.60	7	36.1	-0.06	32.1
2402F									35.7	-0.09	29.9
2405	10.35	1.5	B	1/1000	11.0	25°	1.15	6	38.6	-0.15	28.6
2405	10.70	6.5	B	1/1000	11.0	43°	1.10	6	41.4	-0.03	39.4
2405	10.40	5.4	D	1/1000	11.0	41°	1.10	6	42.3	-0.14	32.9
AP 30	10.35	1.3	B	1/500	5.6	28°	1.50	12	40.3	-0.07	35.6
AP 30	10.70	6.3	B	1/500	5.6	44°	1.70	11	37.3	-0.04	34.6
AP 30	10.40	5.5	D	1/500	5.6	40°	1.60	12	39.2	-0.10	32.6
AP 30	7.01	1.2	B	1/500	5.6	30°	1.50	14	36.5	0.00	36.5
AP 30	7.15	6.2	B	1/500	5.6	44°	1.70	14	41.4	-0.13	32.7
3411	10.35	1.4	B	1/500	8.0	26°	2.10	12	44.0	-0.13	35.3
3411	10.70	6.4	B	1/1000	8.0	44°	2.10	6	41.9	-0.13	31.9
3414	10.80	7.3	-	1/250	5.6	44°	1.80	24	44.2	-0.09	38.2
2476	10.80	7.2	H	1/1000	8.0	44°	1.80	6	57.6	-0.25	41.3
2645	10.70	8.3	D	1/1000	8.0	44°	1.30	7	50.6	-0.23	35.0
2424	10.80	7.1	H	1/1000	11.0	44°	1.80	6	u n s c h a r f		
2445	10.65	2.1	-	1/1000	8.0	44°		5	33.1	-0.05	29.8
2445	10.65	3.3	-	1/1000	5.6	21°		5	38.8	-0.09	30.8
2448	10.65	3.1	-	1/500	5.6	25°		10	30.5	-0.03	28.5
SO-397	10.65	2.2	-	1/1000	8.0	44°		5	41.2	-0.16	30.5
SO-397	10.65	3.2	-	1/1000	5.6	23°		5	39.5	-0.13	30.8
2443	7.05	5.2	D	1/1000	5.6	42°		7	42.7	-0.14	33.4
2443	10.15	5.3	D	1/1000	5.6	42°		5	32.7	-0.05	29.4
SO-131	10.70	8.1	-	1/150	5.6	44°		44	26.0	-0.02	24.7
SO-131	10.70	8.2	-	1/120	5.6	44°		50	29.2	-0.06	25.2

Tabelle 7 Auswertung der mit der RMK A 30/23 gewonnenen Aufnahmeserien (Δs = Bildwanderung)

Anhang 2

Film	Höhe [km]	Flug Nr.	Filter	t [sec]	Blende	Sonnen- elevation	Film- γ	ΔS [μm]	Ro [lp/mm]	m [lp/mm ²]	AWAR ₁₀₀ [lp/mm]
2402	10.35	1.6/1.8	B	1/1000	6.3	20°	2.15	12	32.5	-0.10	25.8
2402	10.65	2.4	B	1/1000	6.3	45°	1.70	10	27.8	-0.03	25.8
2402	10.40	5.6	D	1/1000	6.3	39°	1.60	12	27.8	-0.03	25.8
2402	10.70	6.6	B	1/1000	6.3	43°	1.60	12	34.0	-0.08	28.7
2402	7.01	1.1	B	1/1000	6.3	32°	2.15	14	33.0	-0.13	24.3
2402	7.05	5.1	D	1/1000	6.3	43°	1.60	14	33.8	-0.03	31.8
2402F	10.70	8.4	D	1/1000	6.3	44°	1.60	13	30.0	-0.08	24.7
2405	10.35	1.5	B	1/1000	12.5	25°	1.15	12	35.6	-0.11	28.3
2405	10.70	6.5	B	1/1000	12.5	43°	1.10	12	34.1	-0.08	28.8
2405	10.40	5.4	D	1/1000	12.5	41°	1.10	12	31.6	-0.07	26.9
AP 30	10.35	1.3	B	1/500	6.3	28°	1.50	24	30.5	-0.09	24.5
AP 30	10.70	6.3	B	1/500	6.3	44°	1.70	23	29.9	-0.07	25.2
AP 30	10.40	5.5	D	1/500	6.3	46°	1.60	24	35.6	-0.10	29.0
AP 30	7.01	1.2	B	1/500	6.3	30°	1.50	28	35.7	-0.10	29.0
AP 30	7.15	6.2	B	1/500	6.3	44°	1.70	28	34.9	-0.06	30.9
3411	10.35	1.4	B	1/500	9.0	26°	2.10	24	27.4	-0.06	23.4
3411	10.70	6.4	B	1/1000	9.0	44°	2.10	12	31.9	-0.09	25.9
3414	10.80	7.3	-	1/250	6.3	44°	1.80	51	38.0	-0.10	31.2
2476	10.80	7.2	D	1/1000	9.0	44°	1.80	13	53.0	-0.32	31.7
2645	10.70	8.3	D	1/1000	9.0	44°	1.30	13	35.9	-0.10	29.2
2424	10.80	7.1	D	1/1000	12.5	44°	1.80	13	32.4	-0.18	20.4
2445	10.65	2.1	KL	1/1000	9.0	44°		10	22.8	0.00	22.8
2445	10.65	3.3	KL	1/1000	6.3	21°		10	25.4	0.00	25.4
2448	10.65	2.3	KL	1/1000	6.3	44°		10	24.5	0.00	24.5
2448	10.65	3.1	KL	1/500	6.3	25°		20	24.9	-0.02	23.6
SO-397	10.65	2.2	KL	1/1000	9.0	44°		10	27.0	-0.02	25.8
SO-397	10.65	3.2	KL	1/1000	6.3	23°		12	25.5	0.00	25.5
2443	7.05	5.2	D	1/1000	6.3	42°		14	37.7	-0.16	27.0
2443	10.15	5.3	D	1/1000	6.3	42°		11	28.6	-0.10	21.9
SO-131	10.70	8.1	-	1/150	6.3	44°		88	21.6	-0.05	18.3
SO-131	10.70	8.2	-	1/100	6.3	44°		120	28.8	-0.15	18.8

Tabelle 8 Auswertung der mit der RMK A 60/23 gewonnenen Aufnahmeserien

Zusammenfassung

Zur Vorbereitung auf die erste Spacelabmission wurden Luftbildflüge mit zwei Reihenmeßkammern der Brennweiten $c = 305$ mm und $c = 610$ mm aus 10.5 km Höhe durchgeführt. Das Auflösungsvermögen dieser Kammer mit verschiedenen Film/Filter-Kombinationen wurde anhand eines am Boden ausgelegten schwarz/weißen Balkenmusters bestimmt. Insgesamt wurden 14 verschiedene Luftbildfilme untersucht. Die erzielten Auflösungswerte werden präsentiert und diskutiert.

Abstract

In preparation for the first spacelab mission aerial photographs were obtained with two Metric Cameras with the focal length of $c = 305$ mm and $c = 610$ mm from an altitude of 10.5 km. The resolution of this two cameras with various film/filter combination were tested by means of a black and white bar pattern on the ground. All together 14 different aerial film types were used. The resolution values are presented and discussed in this paper.

Dipl.-Phys. Manfred Schroeder
Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt
für Luft- und Raumfahrt e.V. (DFVLR)
8031 Wessling