

Digitale Luftbildauswertung zur einzelfallbezogenen Erfassung von Altlastverdachtsflächen

Ein Leitfaden für die Praxis

LANUV-Arbeitsblatt 23



**Digitale Luftbildauswertung zur einzelfallbezogenen
Erfassung von Altlastverdachtsflächen**

Ein Leitfaden für die Praxis

LANUV-Arbeitsblatt 23

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2014

IMPRESSUM

Herausgeber Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen (LANUV)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
Telefax 02361 305-3215
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de

Das vorliegende LANUV-Arbeitsblatt ist in einem Projekt entstanden, das vom Arbeitsbereich Geomatik/Fernerkundung im Geographischen Institut der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt wurde.

Autoren Prof. Dr. Carsten Jürgens, Prof. i.R. Dr. Jürgen Dodt, Dr. Andreas P. Redecker
Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, Geomatik/Fernerkundung
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum,
Telefon (0234) 32-23376 oder 32-23358, Telefax (0234) 32-14877 oder 32-14976
E-Mail: carsten.juergens@rub.de, juergen.dodt@rub.de, andreas.p.redecker@rub.de

Projektleitung Bernhard Goldschmidt (LANUV)

ISSN 2197-8336 (Print) 1864-8916 (Internet) LANUV-Arbeitsblätter

Informationsdienste Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter
• www.lanuv.nrw.de
Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179

Bereitschaftsdienst Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV
(24-Std.-Dienst): Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Aufgabe und Ziel des Leitfadens	4
1.2	Aufbau des Leitfadens	5
2	Digitale Luftbilddauswertung in der Verdachtsflächenerfassung	6
2.1	Varianten der Luftbilddauswertung	6
2.2	Arbeitsabläufe der Auswertung	7
3	Digitale Luftbilder: Entstehung – Verfügbarkeit – Auswahl	9
3.1	Digitale Luftbilddatensätze	9
3.1.1	Digital-Luftbilder	10
	Bildformat (11) – Radiometrische und spektrale Bildeigenschaften (12) – Bildgeometrie (15)	
3.1.2	Digitalisierte Luftbilder	18
3.2	Sammlungen erfassungsrelevanter Luftbilder in Nordrhein-Westfalen	22
3.3	Kriterien der Bildauswahl	24
4	Methoden und Techniken der digitalen Vorverarbeitung von Luftbildern	28
4.1	Hard- und Software-Ausstattung	28
4.1.1	Hardware	28
4.1.2	Software	29
4.2	Photographisch-radiometrische Bildvorverarbeitung	30
4.2.1	Photographisch-radiometrische Eigenschaften digitaler Luftbilder	30
4.2.2	Methoden der photographisch-radiometrischen Bildverbesserung	33
	Histogrammoperationen (34) – Filteroperationen (37)	
4.3	Geometrische Bildvorverarbeitung	44
4.3.1	Geometrische Eigenschaften digitaler Luftbilder	44
4.3.2	Geometrische Bildvorverarbeitung	47
	nicht-parametrische Verfahren (50) – parametrische Verfahren (51)	
5	Thematische Auswertung von digitalen Luftbildern	53
5.1	Erkennbarkeit, Identifizierbarkeit und Kartierung erfassungsrelevanter Objekte	53
	Objekterkennbarkeit (53) – Objektidentifizierbarkeit (54) – maßstabs- adäquate Objektkartierung (55)	
5.2	Zur Erfassbarkeit altlastverdächtiger Objekte und Sachverhalte in digitalen Luftbildern	57
6	Hinweise zur Durchführung der digitalen Luftbilddauswertung in der Erfassungspraxis	70
7	Literatur	73

Tabellen

Tab. 1: Technische Merkmale der in NRW eingesetzten Digitalkamera-Systeme.....	12
Tab. 2: Bildformate digitaler Flächenkameras (Pan-Sensoren) und abgedeckte Gelände­flächen.....	13
Tab. 3: Steuerungsfaktoren der Bodenauf­lösung.....	16
Tab. 4: Faktoren der Bodenauf­lösung – zum Zusammen­hang von Pixelgröße, Brennweite und Flughöhe für <i>panchromatische</i> Sensoren	17
Tab. 5: Faktoren der Bodenauf­lösung – zum Zusammen­hang von Pixelgröße, Brennweite und Flughöhe für <i>multispektrale</i> Sensoren	17
Tab. 6: Scanauf­lösung und Dateigröße für ein Standardluftbild 23 x 23 cm.....	21
Tab. 7: Erfassungsrelevante Luftbildbestände in NRW.....	22
Tab. 8: Beispiele für die Verfüg­barkeit von Luftbild-Zeitschnitten für die multitemporale Bildauswertung	25
Tab. 9: Luftbildmaßstab als Steuerungsfaktor der Bodenauf­lösung	26
Tab. 10: Beispielberechnungen zur Beziehung Maßstabsfaktor und Kartierung	56
Tab. 11: Anforderungen an die digitale Luftbildauswertung bei Standortrecherchen.....	71

Abbildungen

Abb. 1: Arbeitsschritte der digitalen Luftbildauswertung	7
Abb. 2: Digitale und digitalisierte Luftbilder – Herkunft und Entstehung	9
Abb. 3: Schema der Aufnahme eines Digital-Luftbilder.....	10
Abb. 4: Scanauf­lösung – Pixelgröße in dpi und μm	19
Abb. 5: Scanauf­lösung – photographische Auflösung lp/mm und μm	20
Abb. 6: Beeinträchtigung der photographischen Qualität von Kriegs­luftbildern; dunst-/ nebel- oder auf­bereitungsbedingt heller, kontrastarmer Abzug.....	31
Abb. 7: Beeinträchtigung der photographischen Qualität von Kriegs­luftbildern	32
Abb. 8: Beeinträchtigung der photographischen Qualität von Kriegs­luftbildern durch Grauwertabfall zu den Rändern (Vignettierung).....	32
Abb. 9: Grundlegende Verfahren der photographischen Bildverbesserung – lineare Kontrastverstärkung/Histogrammstreckung	35
Abb. 10: Grundlegende Verfahren der photographischen Bildverbesserung – Histogrammausgleich.....	36
Abb. 11: Grundlegende Ansätze der photographischen Bildverbesserung – Dodging	38
Abb. 12: Prinzip der Filteroperationen bei der photographisch-radiometrischen Bildvorverarbeitung	39
Abb. 13: Beispiel einer photographischen Bildvorverarbeitung mit Hochpassfilter	40
Abb. 14: Beispiel einer photographischen Bildvorverarbeitung mit Unschärfmaskierung	41
Abb. 15: Beispiel einer photographischen Bildvorverarbeitung mit mehreren Verfahren	42
Abb. 16: Möglichkeiten einer Objektkartierung bei partieller Wolkenabdeckung	43
Abb. 17: Zur Geometrie von Senkrecht-Luftbildern.....	46

Abb. 18: Schema einer Senkrecht- und einer divergenten Senkrechtaufnahme („split vertical“)	46
Abb. 19: Zu den Aufnahmebedingungen bei Aufklärungsflügen	47
Abb. 20: Hinweise zu Objektmessungen in nicht georeferenzierten digitalen Luftbildern	48
Abb. 21: Zur Detailerkennbarkeit in digitalen Luftbildern	54
Abb. 22: Zum Verhältnis von Luftbild- zu Karten-/Kartiermaßstab	56
Abb. 23: Schattenwurf und Bildwahrnehmung	58
Abb. 24: Altablagerungen – räumliche Entwicklung einer Abgrabung	59
Abb. 25: Altablagerungen – Beispiele unterschiedlicher Aufschüttungen	60
Abb. 26: Altablagerungen – kriegsbedingte Hohlformen als potentielle Ablagerungsorte	61
Abb. 27: Altstandorte – Beispiel einer klassifizierbaren Betriebsfläche: Steinkohlenzeche	61
Abb. 28: Altstandorte – Beispiel einer klassifizierbaren Betriebsfläche: Kokerei	62
Abb. 29: Altstandorte – Beispiel einer klassifizierbaren Betriebsfläche: Hüttenwerk	63
Abb. 30: Altstandorte – Beispiel einer klassifizierbaren Betriebsfläche: Erdölraffinerie	64
Abb. 31: Altstandorte – Beispiel einer nicht-klassifizierbaren Betriebsfläche	65
Abb. 32: Militärische Anlagen – Munitionsanstalt	66
Abb. 33: Militärische Anlagen – Fliegerhorst	67
Abb. 34: Militärische Anlagen – Flakstellung	67
Abb. 35: Militärische Anlagen – Schießstand	68
Abb. 36: Altanlagen – Folgeschäden nach Bombenangriffen	69

1 Einleitung

Seit den ersten „Hinweisen“ zur Ermittlung von Altlasten in NRW (MELF 1985) gehören Luftbilder neben Akten, Karten und Plänen sowie Zeitzeugen und Gewährsleuten zu den grundlegenden Quellen, um Altstandorte und Altanlagen zu ermitteln, d.h., sie zu lokalisieren, weiterführende Erkenntnisse über potentielle nutzungsbedingte Kontaminationen zu gewinnen sowie aufgrund der so erhobenen Daten und Informationen auf mögliche Altlasten rückzuschließen. In der Erfassungspraxis wurden über die Jahre – dem Stand der Technik entsprechend – ausschließlich *analoge Luftbilder*, überwiegend Papier-Kontakkopien, herangezogen und mit unterschiedlichen Betrachtungs- bzw. Kartiergeräten durchgehend auch *analog ausgewertet*. Seit den ausgehenden 1990er und frühen 2000er Jahren zeichnet sich hier allerdings ein ebenso tiefgreifender wie weitreichender Wandel ab (s. Dodt/Jürgens/Redecker, 2011): Historisches wie aktuelles filmbasiert aufgenommenes Luftbildmaterial wird von den einschlägigen Archiven bzw. Bildurhebern mittlerweile in aller Regel nur noch in *digitaler Form* als mehr oder weniger hochaufgelöste Rasterdatensätze zur Verfügung gestellt, und neues Luftbildmaterial wird mittlerweile nahezu ausschließlich mit speziellen digitalen Luftbildkameras aufgenommen, mithin also ebenfalls nur in digitaler Form bereitgestellt. Demgemäß erfolgt heute auch die *Auswertung* von Luftbildern und die Sachkartierung zunehmend, vielerorts schon ausschließlich *digital* entweder mit Stereo-Workstations und photogrammetrischer Software oder mit PC-basierten Luftbilddauswertungs- und -kartiersystemen (vgl. ; Schenk, 1999,;Redecker, 2008).

1.1 Aufgabe und Ziel des Leitfadens

Die aufgezeigte Entwicklung von der tradierten analogen zur heutigen digitalen Luftbilddauswertung und -kartierung macht – verständlicherweise – vor der Verdachtsflächenerfassung nicht Halt, sondern betrifft auch hier den Einsatz der Luftbilder. Zwar können aus den digitalen Luftbild-Datensätzen analoge Luftbilder zu einer weiterhin analogen Auswertung hergestellt werden. Allerdings ist dies aus verschiedensten Erwägungen nicht zu empfehlen (vgl. LANUV NRW, 2009; Dodt/Jürgens/Redecker, 2011). Daher werden in der Erfassungspraxis die digitalen Bildvorlagen inzwischen immer häufiger digital ausgewertet – eine Entwicklung, die sich nicht nur fortsetzen wird, sondern die, nicht zuletzt aus Gründen der besseren Arbeitsökonomie und der höheren Ergebnisqualität, über lang oder kurz zum Standard werden dürfte.

In den bislang veröffentlichten Leitfäden des Landes NRW zur einzelfallbezogenen oder flächendeckenden Erhebung von Altlastverdachtsflächen (s. u.a. Dodt et al., 1987; MESA, Bd. 9, MALBO, Bd. 15), in denen die Luftbilddauswertung behandelt wird, liegt beim Thema Luftbilddauswertung – zeitbedingt – der Schwerpunkt auf der analogen Bildauswertung und -kartierung. Dies gilt letztlich selbst für die LANUV-Schrift MALBO 22, die zwar digitales Bildmaterial, speziell die in NRW verfügbaren Kriegsluftbilder, vorstellt, die digitale Auswertung aber nur cursorisch anspricht. Ähnliches gilt für das LANUV-Arbeitsblatt 11 (vgl. LANUV, 2009). Mit anderen Worten: Es gibt bislang keine umfassend-systematischen Hinweise und Empfehlungen zur konsequenten digitalen Luftbilddauswertung in der Verdachtsflächenerfassung,

die dem aktuellen Stand der technischen und methodischen Entwicklung in der Luftbildauswertung entsprechen.

Hier setzt der vorliegende Leitfaden an. Er will aufzeigen, wie heute historische oder auch aktuelle digitale Luftbilder sachgerecht zur Verdachtsflächenerfassung eingesetzt und digital ausgewertet werden können. Dazu sind neben den wesentlichen auswertungsrelevanten Merkmalen und Eigenschaften digitaler Luftbilder zum einen die technischen Grundlagen und Voraussetzungen sowie zum anderen erprobte Vorgehensweisen der digitalen Bildverarbeitung und Bildauswertung vorzustellen. Damit kann in der Praxis der behördlichen Verdachtsflächenerfassung auch überprüft und entschieden werden, ob und inwieweit es möglich ist, digitale Luftbilder selbst digital auszuwerten oder ob dazu Aufträge extern vergeben werden sollten/müssten.

1.2 Aufbau des Leitfadens

Die nachfolgenden Ausführungen zur digitalen Luftbildauswertung in der Verdachtsflächenbearbeitung umfassen sechs Hauptkapitel.

Als Grundlage für die weiteren Ausführungen wird zunächst in Kapitel 2 dargelegt, mit welchen *Zielsetzungen* und – dadurch bedingt – in welchen Varianten die Luftbildauswertung in der Erfassungspraxis zum Einsatz kommt und welche Arbeitsschritte der jeweilige Einsatz erfordert. Die folgenden Kapitel 3 bis 5 orientieren sich an der Standardabfolge der notwendigen Arbeitsschritte: Grundlegend ist hier verständlicherweise die *Beschaffung* digitaler Luftbilder. Dementsprechend zeigt Kapitel 3 auf, wo für die Verdachtsflächenerfassung in NRW geeignetes historisches Luftbildmaterial verfügbar ist und welche Kriterien bei der Auswahl geeigneter Bilder beachtet werden sollten. Wie die Bilder photographisch-radio-metrisch sowie geometrisch aufzubereiten sind, damit sie sachgerecht ausgewertet werden können, und wie ein für die Bildaufbereitung und -auswertung geeigneter Arbeitsplatz ausgestattet sein sollte, behandelt Kapitel 4. Das folgende Kapitel 5 verdeutlicht exemplarisch Möglichkeiten und Grenzen der Identifizierbarkeit von Altanlagen, Altablagerungen und Kriegseinwirkungen in digitalen Luftbildern. Abschließend gibt Kapitel 6 mit einer zusammenfassenden Übersicht über die Anforderungen an die personellen und technischen Ausstattungsvarianten Hinweise zur Umsetzung der digitalen Luftbildauswertung in der Erfassungspraxis

2 Digitale Luftbildauswertung in der Verdachtsflächen- erfassung

In mehreren Leitfäden der Umweltverwaltung NRW, die seit den ausgehenden 1980er Jahren vorgelegt worden sind, wurde direkt oder indirekt aufgezeigt, *wie* eine multitemporale Luftbildauswertung zur Erfassung von Altlastverdachtsflächen in der Praxis vorgenommen werden sollte. Über die bereits vorangehend (in Kap. 1.1) aufgeführten Veröffentlichungen hinaus seien hier insbesondere die „Anforderungen an Sachverständige bei der Bearbeitung von Altlasten“ (LUA NRW, 1997) genannt. Allerdings ist der Begriff „Luftbildauswertung“ sachinhaltlich nicht exakt festgelegt, und in der Erfassungspraxis sind die empfohlenen Standards aus meistens sehr pragmatischen Zeit-Kostenerwägungen nur relativ selten in der vorgeschlagenen idealtypisch-optimalen Form umgesetzt worden. So haben sich unterschiedliche *Varianten des Einsatzes von Luftbildern* herausgebildet, die ungeachtet aller Unterschiede als „Luftbildauswertung“ bezeichnet werden. Sie werden nachfolgend beschrieben, und es werden die zur Umsetzung dieser Auswertungsvarianten notwendigen bzw. zweckmäßigen Arbeitsschritte in ihrer Abfolge („Workflow“) aufgezeigt.

2.1 Varianten der Luftbildauswertung

Vereinfachend können in der Praxis der Nutzung von Luftbildern als Informationsquellen zur einzelfallbezogenen Erfassung altlastverdächtiger Flächen zwei *Grundvarianten* ausgemacht werden. Sie weisen zwar vielfach gleitende Übergänge auf, unterscheiden sich jedoch in der *Zielsetzung* bzw. *Funktion der Bildauswertung* in der Standortrecherche. Zugleich nehmen Funktion und Zielsetzung entscheidenden Einfluss auf die bei der Bildauswertung einzusetzenden *Methoden* und *Techniken*.

Zweckmäßigerweise sind in Anlehnung an DIN 18716-2 (3.3.5 und 3.3.6) bei idealtypischer Ausprägung die folgenden *Auswertungsansätze* zu unterscheiden:

1. Die Luftbilder werden in Form von *Einzelbildern monoskopisch* als zweidimensionale Geländeabbildungen oder aber als *Bildpaare stereoskopisch* als dreidimensionale Geländewiedergaben *visuell durchgemustert* und nach erfassungsrelevanten Objekten und Sachverhalten *durchsucht*. Das Ergebnis dieser Bildanalyse, d.h. die als relevant identifizierten Objekte und Gegebenheiten wie Produktionsanlagen, Gebäude, Geländevertiefungen oder Kriegseinwirkungen, werden nach Art, also Sachkategorien, und Ausprägung/Zustand sowie im Bedarfsfall auch mit ihren wesentlichen Größendimensionen verzeichnet. Um die Objekte zu verorten, werden sie entweder in einer topographischen Karte, etwa der DGK5, markiert oder aber mittels indirekter Lageangaben, z.B. Flurstück oder Straße mit Hausnummer, registriert. Gemäß DIN 18746-2 (3.3.5) handelt es sich bei diesem Auswertungsansatz in wesentlichen, wenngleich nicht in allen Aspekten um eine *Luftbildinterpretation*. Im Folgenden wird dieser Ansatz als *qualitativ-beschreibende Luftbildauswertung* bezeichnet.
2. Wie beim ersten Verfahrensansatz müssen die erfassungsrelevanten Objekte und Sachverhalte auch beim zweiten Auswertungsansatz durchgehend erkannt, identifiziert sowie nach Kategorien und Zustand differenziert und klassifiziert werden. Aller-

dings werden sie nun nicht nur verzeichnet und deskriptiv bzw. zeichnerisch näherungsweise verortet, sondern direkt und *geometrisch lagegetreu* mit in der Regel x- und y- sowie (objektabhängig) auch z-Koordinaten *kartiert*. Nach DIN 18746-1 (3.3.6) ist die hier erforderliche Gewinnung und (kartographische) Verarbeitung der exakten geometrischen Objektinformation als *Bildmessung* zu bezeichnen. In den folgenden Ausführungen wird dieser Verfahrensansatz daher als *quantitativ-kartierend* bzw. als *Verdachtsflächenkartierung* bezeichnet.

2.2 Arbeitsabläufe der Auswertung

Im Ablauf der Luftbilddauswertung sind die beiden aufgezeigten Grundvarianten in den ersten – grundlegenden – Arbeitsschritten identisch (vgl. Abb. 1): Vorab ist das gesamte aus der potentiell kontaminationsrelevanten Zeitspanne überlieferte *Luftbildmaterial* in den einschlägigen Archiven und Sammlungen zu *ermitteln* (s. nachfolgend Kap. 3.1. und 3.2) und in seinem Informationswert einzuschätzen, so dass eine fallbezogen-sachgerechte *Auswahl* der im Weiteren zu berücksichtigenden digitalen bzw. digitalisierten Bilder getroffen und das geeignete Bildmaterial beschafft werden kann (s. Kap. 3.3).

	Auswertung	
	qualitativ- beschreibend (Luftbildinterpretation)	quantitativ- kartierend (Luftbildkartierung)
[1] Bildermittlung	ja	ja
[2] Bildauswahl/-beschaffung	ja	ja
[3] Bildvorverarbeitung: photographisch-radiometrisch	ja	ja
[4] Bildvorverarbeitung: geometrisch	bei Objekt-/Distanzmessungen (dringend) empfehlenswert	durchgehend unabdingbar Standardaufnahmen vs. ältere historische Befliegungen
[5] Thematische Bildauswertung/-kartierung	ja	ja

Abbildung 1: Arbeitsschritte der digitalen Luftbilddauswertung

Die folgenden Arbeitsschritte dienen der Aufbereitung des ausgewählten Bildmaterials als Vorstufe zur eigentlichen Bildauswertung. Hier betrifft die *photographisch-radiometrische Bildvorverarbeitung* und *-verbesserung* (s. Kap 4.2.) gleichermaßen sowohl die qualitativ-beschreibende als auch die quantitativ-kartographische Bildanalyse, denn jede „Objektansprache“, also auch die Kartierung, setzt ein zuverlässiges Erkennen und Identifizieren der Bildinhalte/Geländeobjekte, d.h. eine hinreichende photographisch-radiometrische Qualität der Bilder, voraus. Hier ist historisch nach Aufnahmezeiträumen zu differenzieren, insbesondere nach Kriegs- und frühen Nachkriegsjahren sowie der Folgezeit bis heute, da das ent-

sprechende Luftbildmaterial u.U. ganz erhebliche photographisch-qualitative Unterschiede aufweisen kann.

Ob im nächsten Arbeitsschritt (Kap. 4.3) die ausgewählten Luftbilder auch *geometrisch aufbereitet*, also *entzerrt* und *georeferenziert*, werden sollen/müssen, hängt letztlich vom jeweiligen Auswertungsansatz ab: Soll nur qualitativ-deskriptiv ausgewertet werden, kann vielfach auf eine geometrische Bildvorverarbeitung verzichtet werden. Sollen allerdings zur genaueren Kennzeichnung und Präzisierung qualitativ-beschreibende Angaben auch Größendimensionen von Objekten und Distanzen ermittelt werden, ist eine geometrische Bildvorverarbeitung dringend angeraten (Kap. 4.3.2). Sind die Altanlagen, Altstandorte und Kriegseinwirkungen bzw. Havariebereiche möglichst lagegenau zu kartieren, dann ist die geometrische Bildvorverarbeitung letztlich unabdingbar (Kap. 4.3.3). In der Praxis ist dabei dahingehend zu differenzieren,

- ob nur einzelne Stereomodelle oder größere Bildblöcke zu entzerren, d.h. zu triangulieren, sind und
- ob es sich um Bilder aus „DIN-gerechten“ Standardbefliegungen oder aber um historisches Bildmaterial etwa aus Aufklärungsflügen des Zweiten Weltkriegs oder der frühen Nachkriegsjahre handelt, für die in der Regel die zur geometrischen Aufbereitung erforderlichen grundlegenden Metadaten (z.B. Kalibrierungsprotokolle) nicht überliefert bzw. archivisch nicht erschlossen und zugänglich sind.

Sind die verfügbaren und relevanten Luftbilder photographisch-radiometrisch sowie geometrisch aufbereitet und verbessert, folgt als letzter Arbeitsschritt deren *thematische Analyse*, d.h. die Lokalisierung und Identifizierung sowie die qualitativ-beschreibende bzw. quantitativ-kartierende Dokumentation der Altanlagen und Altablagerungen sowie der von Kriegseinwirkungen bzw. sonstigen kontaminationsrelevanten Ereignissen betroffenen Bereiche (Kap. 5.1 – 5.2).

In der Erfassungspraxis sollte der vorangehend skizzierte Arbeitsablauf pragmatisch-flexibel umgesetzt werden. So kann durchaus mit der Luftbildauswertung von behördenintern bereits vorliegenden Luftbild-Zeitschnitten begonnen werden, wenn noch nicht alle überlieferten Befliegungen bekannt sind bzw. vorliegen und noch nicht über die objekt- und überlieferungsspezifisch optimale Zeitschnittauswahl entschieden wurde. Allerdings besteht hier dann evidentermaßen das Risiko, einen „Fehlgriff“ zu tun, also auch Zeitschnitte auszuwerten, die für die Erfassung der Standort-Belastung nicht sonderlich relevant und aussagekräftig sind. Generell sollte daher der vorangehend skizzierte Workflow – soweit möglich und arbeitstechnisch vertretbar – konsequent eingehalten werden.

3 Digitale Luftbilder: Entstehung – Verfügbarkeit – Auswahl

Um Luftbilder – digitale ebenso wie analoge – sachgemäß auswerten bzw. vorliegende Auswertungsergebnisse sachgerecht bewerten zu können, sollte bekannt sein, welchen Ursprung das Bildmaterial hat, d.h., wie es entstanden und wie bzw. wo es überliefert worden ist. Darüber hinaus sollte es einen Kriterienkatalog (vgl. Kap. 3.3) geben, nach dem im Einzelfall Bildmaterial für die Auswertung auszuwählen ist, wenn zur multitemporalen Rekonstruktion einer Standortentwicklung umfangreiches Bildmaterial in enger Zeitschnitt-Abfolge zur Verfügung steht.

3.1 Digitale Luftbilddatensätze

Die heute für die Verdachtsflächenerfassung in Nordrhein-Westfalen in *digitaler Form verfügbaren Luftbilder* sind aufgrund ihrer Entstehung und „Herkunft“ und in zwei Kategorien (s. Abb. 2) einzuteilen:

1. originär und direkt mit *digitalen Messkameras* gemäß DIN 18740-4 *aufgenommene Bilder*; sie werden im Folgenden als *Digital-Luftbilder* bezeichnet;
2. durch *Scannen* aus analogen filmbasiert-photographischen Luftbildvorlagen *gewonnene Bilder*; sie werden nachfolgend als *digitalisierte* oder auch als *gescannte* Luftbilder bezeichnet (s. DIN 18740-2 und Franken/Hoffmann, 2010).

Betreffen die Ausführungen im Folgenden sowohl die Digital-Luftbilder als auch die digitalisierten Luftbilder, wird als Begriff, der beide Bildarten umfasst, die Bezeichnung *digitale Luftbilder* verwendet.

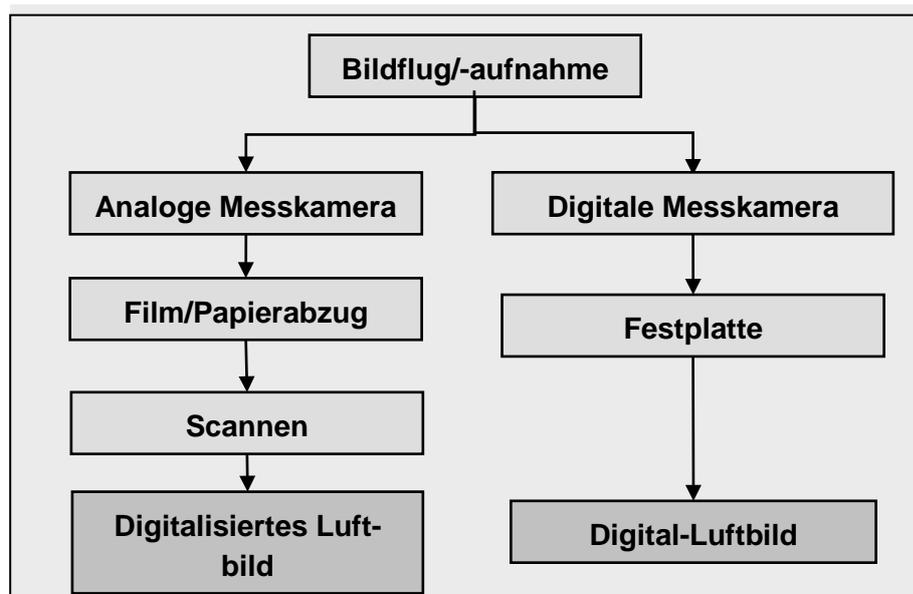


Abbildung 2: Digitale und digitalisierte Luftbilder – Herkunft und Entstehung

Bei Luftbildern von NRW, die vor 2005/2006 entstanden sind, handelt es sich ausschließlich um *mittelbar* aus analogen photographischen Luftbildvorlagen durch Scannen abgeleitete digitale Bilddatensätze, also *digitalisierte Luftbilder*. Die jüngeren, d.h. ab 2007/ 2008 bzw. seit 2009 aufgenommenen NRW-Luftbildbestände bestehen dagegen überwiegend (seit 2007/2008) bzw. nahezu ausschließlich (seit 2009) aus *unmittelbar* digital aufgenommenen Bildern, also *Digital-Luftbildern*. Im Folgenden werden die beiden Kategorien digitaler Luftbilder in ihrer Entstehung sowie ihren wesentlichen, bei der Auswertung zur Erfassung von Verdachtsflächen zu beachtenden Merkmalen behandelt.

3.1.1 Digital-Luftbilder

Wie definiert, sind Digital-Luftbilder das Ergebnis einer flugzeugbasierten Luftbildaufnahme mit speziellen *großformatigen Digitalkameras*. Während bei konventionellen photographischen Luftbildern die vom Gelände reflektierte Strahlung auf (Flieger-)Film aufgezeichnet wird, registrieren digitale Luftbildkameras die Geländestrahlung über Detektoren, welche die reflektierte Strahlung in entsprechende digitale Signale umwandeln (s. Abb. 3).

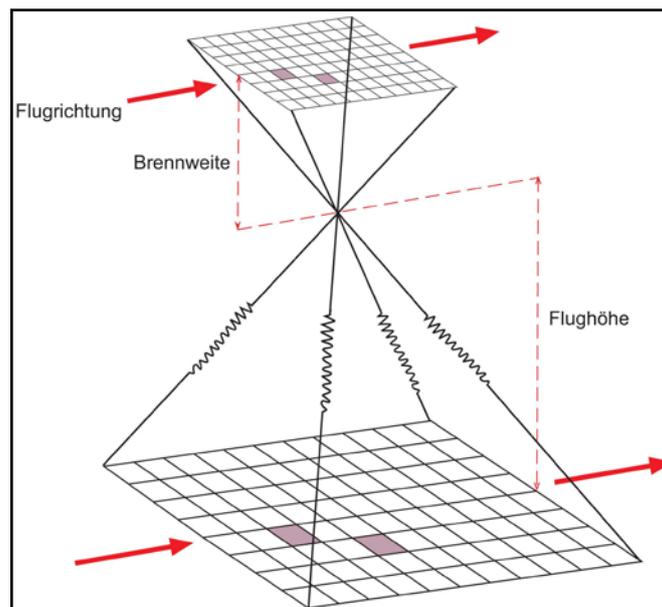


Abbildung 3: Schema der Aufnahme eines Digital-Luftbildes

Bei den *Luftbild-Digitalkameras* sind *aufnahmetechnisch* Zeilenkameras und Flächenkameras, auch Matrixkameras (vgl. AFL, 2012), zu unterscheiden. In den topographischen Befliegungen der nordrhein-westfälischen Landesvermessung, wie auch anderweitig bei Bildflügen für Vermessungszwecke, wurden bisher ausschließlich Flächensensoren eingesetzt. Im Folgenden sollen daher nur die *Flächenkamera-Systeme* und die damit aufgenommenen digitalen Luftbilder behandelt werden. Unter ihnen sind angesichts des für Nordrhein-Westfalen

vorliegenden Digital-Luftbildmaterials¹ zwei Systeme bzw. Systemreihen von besonderer Bedeutung:

1. das UltraCam-System mit den Modellen UCD, UCX und UCXp sowie
2. das Digital Mapping Camera-System (DMC) und dessen Weiterentwicklung DMC II (2. Generation). Im Vergleich zur ersten Generation (DMC), bei der mehrere Teilbilder nach der Aufnahme zu einem panchromatischen Bild zusammengefügt werden, nimmt die zweite Generation das Gelände in einem einzigen Bild auf.

Beim praktischen Einsatz der Digitalkameras im *Bildflug* gelten im Wesentlichen die gleichen *Rahmenbedingungen* wie für Aufnahmen mit photographischen Analogkameras (s. DIN 18740-1, 4.3. und DIN 18740-4, 4.2, ferner LANUV NRW, 2013, Kap. 3.4.2): Die Bilder werden in *Flugstreifen* mit einer Längsüberdeckung der einzelnen Bilder von in der Regel $\geq 60\%$ und die einzelnen Flugstreifen mit einer Querüberdeckung von mindestens 15% (s. DIN 18740-4, 4.2.1), üblicherweise $20 - 30\%$, aufgenommen.

Wie die klassischen photographischen Luftbilder bilden auch die mit den vorgenannten Flächenkameras aufgenommenen *digitalen Luftbildbilder* das Gelände in der *Zentralprojektion* ab (vgl. Abb. 3): Die reflektierte Geländestrahlung wird im Brennpunkt des Kameraobjektivs gebündelt und zur Aufzeichnung auf die Sensoren geleitet, um dann in geeigneten Speichersystemen (z.B. Festplatten) gespeichert zu werden.

Die wesentlichen technischen Merkmale der für die Aufnahmen digitaler Luftbilder in Nordrhein-Westfalen eingesetzten Flächenkamera-Systeme sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Im Hinblick auf die *Praxis* der Bildauswertung sind vor allem die folgenden Punkte zu beachten:

1. Bildformat
2. radiometrische und spektrale Bildeigenschaften
3. Bildgeometrie

Zu 1: Bildformat

Im Vergleich zu konventionellen photographischen Reihenmessbildern, die – mit Ausnahme einiger Kriegsluftbilder – in der Regel quadratische Bildfelder von $18 \times 18 \text{ cm}^2$ bzw. $23 \times 23 \text{ cm}^2$ aufweisen, sind die digitalen Luftbilder rechteckig und insgesamt mehr oder minder deutlich, nämlich bis zur Hälfte und mehr, kleiner. Demzufolge bilden sie, wie Tabelle 2 beispielhaft im Vergleich mit der Geländeabdeckung eines konventionellen photographischen Luftbilds im $18 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ -Bildfeldformat (rechte Spalte) verdeutlicht, jeweils – erheblich – kleinere Geländeausschnitte ab als die maßstäblich entsprechenden analogen Bilder. In der Praxis der Verdachtsflächenerfassung sind daher beim Einsatz von Digital-Luftbildern im Vergleich mit analogen Bildern meistens mehr Einzelluftbilder bzw. Stereomodelle zu bearbeiten, d.h., es müssen

¹ Eine vergleichende Übersicht über die verschiedenen digitalen Luftbildkameras vermitteln u.a. Jacobsen, 2008 und 2010 sowie AFL 2012. Zum digitalen Luftbildmaterial in NRW vgl. www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07_produkte/bildinformationen/luftbilder/index.html

- bei qualitativ-beschreibender Auswertung mehr Bilder bzw. Bildmodelle am Bildschirm aufgerufen und sachinhaltlich vergleichend analysiert sowie
- bei quantitativ-kartierender Auswertung zusätzlich auch entzerrt bzw. georeferenziert werden.

Dementsprechend ist je nach Ausdehnung des zu untersuchenden Gebietes und dessen Lage im Bildblock bzw. im Bildstreifen ein vergleichsweise höherer Handhabungsaufwand, z.B. für die Vorbereitung und Vorverarbeitung der Bilder zur Auswertung, zu erbringen.

Tabelle 1: Technische Merkmale der in NRW eingesetzten Digitalkamera-Systeme (nach: Z/I Imaging [<http://www.ziimaging.com/>] und Microsoft Ultracam [<http://www.microsoft.com/ultracam/>])

Merkmal	DMC	DMC II 250	Ultra-Cam D	Ultra-Cam X	Ultra-Cam Xp
Brennweite	panchrom.: 120 mm multispekt. 25 mm	panchrom.: 112 mm multispekt. 45 mm	panchrom.: 100 mm multispekt. 28 mm	panchrom.: 100 mm multispekt. 33 mm	panchrom.: 100,5 mm multispekt. 33 mm
Sichtfeld	in Flugrichtung: 44 ° quer zur Flugrichtung 74°	in Flugrichtung: 40,2° quer zur Flugrichtung: 46,6°	in Flugrichtung: 37° quer zur Flugrichtung: 55°	in Flugrichtung: 37° quer zur Flugrichtung: 55°	in Flugrichtung: 37° quer zur Flugrichtung: 55°
Anzahl der Kameraköpfe	panchrom.: 4 multispekt.: 4	panchrom.: 1 multispekt.: 4	panchrom.: 4 multispekt.: 4	panchrom.: 4 multispekt.: 4	panchrom.: 4 multispekt.: 4
Anzahl der CCDs in Flugrichtung	panchrom.: 7.680 multispekt.: 2.048	panchrom.: 14.656 multispekt.: 6096	panchrom.: 7.500 multispekt.: 2.672	panchrom.: 9.420 multispekt.: 4.992	panchrom.: 11.310 multispekt.: 3.770
Anzahl der CCDs quer zur Flugrichtung	panchrom.: 13.824 multispekt.: 3.072	panchrom.: 17.216 multispekt.: 6846	panchrom.: 11.500 multispekt.: 4.008	panchrom.: 14.430 multispekt.: 3.328	panchrom.: 17.310 multispekt.: 5.770
Sensor-Größe	12 µm	5,6 (pan)/7,2 (ms)	9 µm	7,2 µm	6 µm
radiometrische Auflösung	12 Bit	14 Bit	> 12 Bit	12 Bit	12 Bit
spektrale Auflösung (in µm)	panchrom: 0,4 – 0,9 blau: 0,4 – 0,58 grün: 0,5 – 0,65 rot: 0,59 – 0,68 nIR: 0,68 – 0,85	Spektralbereiche durch individuelle Filter definiert. Panchromat. Kanal: bis max. 0,71	panchrom: 0,41 – 0,69 blau: 0,48 – 0,63 grün: 0,58 – 0,70 rot: 0,69 – 1,00 nIR: 0,62 – 1,00		

Zu 2: Radiometrische und spektrale Bildeigenschaften

Radiometrisch erfassen die Digitalkamera-Systeme die vom Gelände reflektierte Strahlung zum einen im gesamten Spektralbereich des sichtbaren Lichts (DMC: einschließlich des nahen Infrarots) und zum anderen jeweils separat in den Teilbereichen des blauen, grünen und

roten sowie des nahen infraroten Lichts (in Tab. 1: Zeile „spektrale Auflösung“). Damit liefern sie in synchroner Aufnahme abdeckungsidentische *panchromatische Schwarzweiß-* sowie multispektral *Echtfarb-* und (in NRW seit 2009/10) auch *Falschfarb-(Colorinfrarot-)bilder*. Da das zur multitemporalen Luftbilddauswertung verfügbare analoge bzw. digitalisierte historische Bildmaterial im Wesentlichen nur panchromatische Schwarzweißbilder umfasst, wird man im Regelfall bei der Auswertung von Digital-Luftbildern – trotz der Verfügbarkeit von Farbbildern – die panchromatische Bildversion heranziehen. Diese Bilder haben bei einer Auflösung von 12 bzw. 14 Bit und somit 4.096 bzw. 18.384 Tonwertstufen (in Tab. 1: Zeile radiometrische Auflösung) eine deutlich höhere radiometrische Empfindlichkeit als die mit Analogkameras aufgenommenen Schwarzweißbilder². Bei 4.096 Tonwertstufen wird die reflektierte Strahlung

Tabelle 2: Bildformate digitaler Flächenkameras (Pan-Sensoren) und abgedeckte Geländeflächen
(nach: Z/I Imaging [<http://www.ziimaging.com/>] und Microsoft Ultracam [<http://www.microsoft.com/ultracam/>])

Digital-kamera	Detektorelement <i>Bild-format</i> in cm	Brennweite mm	Flughöhe m	Maßstab gerundet	abgebildete Geländefläche km/km ² gerundet	Analog-Kamera Bildfeld: 18 x 18 cm Geländefläche im Digitalbild-Maßstab km/km ² /gerundet
DMC	9,2 x 16,6	120	2.000	1:16.700	1,5 x 2,8 = 4,2	3,0 x 3,0 = 9,0
			2.500	1:20.800	1,9 x 3,5 = 6,7	3,7 x 3,7 = 13,7
			3.000	1:25.000	2,8 x 5,0 = 14	4,5 x 4,5 = 20,3
DMC II 250	8,2 x 9,6	112	2.000	1:17.900	1,5 x 1,7 = 2,6	3,2 x 3,2 = 10,2
			2.500	1:22.300	1,8 x 2,2 = 4,0	4,0 x 4,0 = 16,0
			3.000	1:26.800	2,2 x 2,6 = 5,7	4,8 x 4,8 = 23,0
UCD	6,7 x 10,3	100	2.000	1:20.000	1,3 x 2,1 = 2,1	3,6 x 3,6 = 13,0
			2.500		1,7 x 2,6 = 4,4	
UCX	6,8 x 10,3	100	3.000	1:25.000	2,0 x 3,1 = 6,2	4,5 x 4,5 = 20,3
UCXp			2.000	1:30.000	1,4 x 2,1 = 2,9	5,4 x 5,4 = 29,2
			2.500		1,7 x 2,6 = 4,4	
			3.000		2,1 x 3,1 = 6,5	

in 0,025%-Schritten und bei 18.384 Tonwertstufen sogar in 0,005%-Schritten differenziert. Dadurch machen die Bilder auch schwächste Reflexions-, also Grauwertunterschiede zwischen Geländeobjekten sichtbar und gewährleisten somit vielfach eine bessere Detailerkennbarkeit und Objektidentifizierung. Dementsprechend ist die radiometrische Auflösung der Digital-Luftbilder für die Praxis der Verdachtsflächenerfassung mehr als ausreichend. Pragmatisch sollte dabei allerdings bedacht werden: Bei einfacher visueller Auswertung der Bilder am Bildschirm (und erst recht als analoge, also ausgedruckte Papiervorlage) ist erfahrungsgemäß nur etwa ein (gutes) Dutzend Grauwertabstufungen differenziert wahrzunehmen.

² Zwar können die konventionellen photographischen Luftbilder beim Digitalisieren mit einer höheren, z.B. 12-Bit-Auflösung gescannt werden. Verständlicherweise erhöht sich dadurch aber nicht der engere ursprüngliche Dynamikbereich der Filme.

men, d.h. zuverlässig zu unterscheiden, und bei einer pixelscharfen softwaregestützten digitalen Grauwert-Abfrage erlauben feine Grauwertunterschiede normalerweise kaum fundierte Rückschlüsse zur Objektidentifizierung. Mit anderen Worten: Die gegenüber den üblichen 8 Bit mit 12 oder neuerdings 14 Bit deutlich höhere radiometrische Auflösung der aktuellen Digital-Luftbilder gewährleistet bei der Verdachtsflächenerfassung keine (zwangsläufig) bessere, d.h. schnellere Auswertbarkeit und/oder zuverlässigere, differenziertere Auswertungsergebnisse.³

Ähnliches gilt derzeit auch für die *spektrale Auflösung* der Digital-Luftbilder (s. Tab. 1). Zwar sind, wie vorangehend dargelegt, aus den Aufnahmedaten jeder Befliegung neben den panchromatischen Schwarzweiß-Bildern auch *Echtfarbbilder* des aufgenommenen Geländes zu generieren. Diese können dank ihrer realitätsnahen Farbwiedergabe bei der Erfassung von Altstandorten und Altablagerungen zwar eine (etwas) schnellere Objektidentifizierung ermöglichen. Zugleich ist hier aber zu beachten, dass das geringere geometrische Auflösungsvermögen der multispektralen Farbkanäle (vgl. dazu im Folgenden Tab. 3) die Objekt- und Objektdetailerkennbarkeit auch mehr oder minder stark zu beeinträchtigen vermag.

Ob und inwieweit die *Falschfarb-(Colorinfrarot-)Version* der Digital-Luftbilder zur – besseren – Verdachtsflächenerfassung beitragen kann, ist zurzeit offen (s. auch LANUV NRW, 2013, Infobox 1 in Kap. 3.4.1). Auf den ersten Blick mögen die Falschfarben bei der Bildauswertung und Objektidentifizierung irritieren, da sie eine „Umsetzung“ in Echtfarben erfordern. Allerdings lassen die Colorinfrarot-(CIR-)Bilder besser als die panchromatische oder auch die Echtfarbversion in unbewachsenen, vegetationsfreien Bereichen, etwa auf vormaligen Lagerflächen oder jüngeren Verfüllungen bzw. Aufhaldungen, Bodenverfärbungen erkennen, und vegetationsbedeckte Bereiche sind entweder visuell aufgrund von Farbanomalien oder über Vegetationsindices⁴ nach dem Zustand der Vegetationsdecke zu differenzieren. Als schwierig bis problematisch ist in diesen Fällen allerdings die Interpretation der Auswertungsbefunde anzusehen: Die Bodenverfärbungen bzw. die Vitalitäts- und Dichteunterschiede der Vegetation können durchaus oberflächennahe Bodenbelastungen anzeigen; ebenso können sie aber auch unterschiedlichste andere Ursachen haben.

Für die *Erfassungspraxis* bedeutet dies: Die *monotemporale Auswertung* der CIR-Bilder aus einer Befliegung mit Digitalkamera erlaubt normalerweise nur (sehr) eingeschränkt Rückschlüsse auf potentiell kontaminierte Bereiche und schädliche Bodenverunreinigungen (vgl. Dodt/Mark, 1994). Dank des inzwischen üblichen Befliegungsrhythmus von drei Jahren⁵ steht aber zunehmend digitales CIR-Bildmaterial auch für eine *multitemporale Standortanalyse* zu Verfügung. Damit ist es möglich (bzw. es wird zukünftig möglich sein), multitemporal zu überprüfen, ob und inwieweit auffällige Bodenverfärbungen und/oder Vegetationsanoma-

³ Die höhere radiometrische Auflösung bedingt entsprechend größere Datenmengen. Gegenüber herkömmlichen 8-Bit-Bilddaten ist bei Bildern von 9- bis 16-Bit die doppelte Speicherkapazität erforderlich. Dieser zunehmende Speicherplatzbedarf ist bei der technischen Ausstattung der eingesetzten Arbeitsplatzrechner zu beachten (vgl. Kap. 4.1).

⁴ Die Vegetationsindices nutzen die Reflexionswerte von Spektralkanälen, in denen unbewachsene und vegetationsbewachsene Flächen sowie die Vegetation entsprechend ihrer Vitalität deutlich differieren. Es sind dies vor allem die Spektralbereiche von Rot und nahem Infrarot. Vgl. ausführlicher Hildebrandt 1996, Kap. 2.3.2.5.

⁵ Vgl. GEObasis NRW unter www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07_produkte/bildinformationen/luftbilder, Untermenü „Digitale Luftbilder“

lien fortbestehen, so dass dann durchaus auch zuverlässigere Rückschlüsse auf potentielle Bodenbelastungen denkbar erscheinen. Zugleich bieten sich die aktuellen Digital-Luftbilder als Grundlage für ein Monitoring von Betriebsflächen an, die derzeit in Teilen noch genutzt, teilweise aber stillgelegt und als potentielle Altstandorte bzw. Ablagerungen anzusehen sind.

Zu 3: Bildgeometrie

Geometrisch unterscheiden sich die mit Flächenkameras aufgenommenen Digital-Luftbilder praktisch nicht von analogen photographischen Reihenmessbildern. Wie die konventionellen photographischen Luftbilder können sie dank der Längsüberdeckung im Bildstreifen *stereoskopisch* als *dreidimensionale Modelle* betrachtet, ausgewertet und „auskartiert“ werden. Der *Bildmaßstab* ergibt sich aus dem Verhältnis von Brennweite der Kamera zur Flughöhe über dem Gelände, und Höhenunterschiede im Gelände sowie Roll- bzw. Nickbewegungen des Flugszeugs verursachen auch bei den digitalen Bildern mehr oder weniger empfindliche *räumlich-geometrische Lageungenauigkeiten* („Verzerrungen“) der Geländeabbildung (vgl. Kap. 4.3.1).

Allerdings ist ein grundlegender Unterschied zu den konventionellen photographischen Aufnahmen zu beachten: Bei der Planung analoger photographischer Luftbildaufnahmen spielt als einer der elementaren Steuerungsfaktoren der Erkennbarkeit und Identifizierbarkeit von Objekten und Objektdetails vor allem der Bildmaßstab eine Rolle (vgl. Hildebrandt, 1996). Bei Digital-Befliegungen wird dagegen die Bodenauflösung eines Pixels zum Schlüsselparаметer.

Die *Bodenauflösung*, auch als *Ground Sampling Distance* (GSD) bezeichnet⁶, definiert die Ausdehnung der Geländefläche, deren reflektierte Strahlung in einem Bildelement (Pixel) wiedergegeben wird. So hat beispielsweise das von GEObasis NRW angebotene digitale Standard-Bildmaterial mit der Produktbezeichnung DLB 20 eine Bodenauflösung von 20 cm, d.h., jedes Bildelement (Pixel) gibt die Reflexion eines Bodenelements von 20 x 20 cm² wieder⁷. Die *Größenordnung der Bodenauflösung* (in cm) ist abhängig von (1.) der Größe der Pixel (s_0 , in μm), (2.) der Brennweite der Kamera (f , in cm) sowie (3.) der Flughöhe über Grund (Z_G , in m). Dabei gilt:

$$\text{Bodenauflösung} = \text{Flughöhe/Brennweite} \times \text{Pixelgröße}$$

$$\text{GSD} = Z_G/f \times s_0$$

In Tabelle 3 sind im oberen Abschnitt die Parameter Pixelgröße und Brennweite der derzeit in der Praxis eingesetzten Digital-Flächenkameras für panchromatische bzw. multispektrale

⁶ Siehe www.bezreg-koeln.nrw.de, Untermenü: Abteilung 7- GEObasis NRW: Produkte und Dienste, hier: Topographische Bildinformationen (Luftbilderzeugnisse). In der Produktbeschreibung der DLB (Digitale Luftbilder) wird auch das englische Kürzel GSD zur Kennzeichnung der Bodenauflösung verwendet.

⁷ Neben den DLB 20 bietet GEObasis NRW unter der Produktbezeichnung DLB10 die Aufnahmen aus einer geometrisch hochaufgelösten Frühjahrsbefliegung (ohne nahes Infrarot) mit 10 cm Bodenauflösung an. Die Bilder zeigen das Gelände laubfrei und sind daher bei der Erfassung und Kartierung aktueller Verdachtsflächen nicht nur wegen ihrer höheren geometrischen Auflösung als Alternative zu den DLB20 in Betracht zu ziehen.

Aufnahmen zusammengestellt. Die drei folgenden Tabellenabschnitte verdeutlichen exemplarisch, wie das Zusammenspiel der je nach Kameratyp konstruktionsbedingt konstanten Grundparameter Pixelgröße und Brennweite sowie der bildflugspezifisch variierenden Flughöhe die Größenordnung der Bodenauflösung bestimmt. Generell wird hier deutlich:

- Die Bodenauflösung ist direkt proportional zur Bildpixelgröße: je kleiner die Pixel, desto kleiner die aufgenommenen Bodenelemente und desto besser die Bodenauflösung.

Tabelle 3: Steuerungsfaktoren der Bodenauflösung

Kamera		Bildpixel (s_0 in μm)	Brennweite (f in mm)	Flughöhe (Z_G in m)	Bodenauflösung (GSD in cm)
DMC	panchrom.	12	120	variabel	variabel (s. unten)
	multispektr.	12	25		
DMC II 250	panchrom.	5,6	112		
	multispektr.	7,2	45		
UltraCam D	panchrom.	9	100		
	multispektr.	9	28		
UltraCam X	panchrom.	7,2	100		
	multispektr.	7,2	33		
UltraCam Xp	panchrom.	6	100		
	multispektr.	6	33		
Bodenauflösung in Abhängigkeit von Bildpixelgröße					
		5,6	100	2000	11,2
		6,0			12,0
		7,2			14,4
		9,0			18,0
		12,0			24,0
Bodenauflösung in Abhängigkeit von Brennweite					
		7,2	28	2000	51,4
			33		43,6
			100		14,4
			112		12,8
			120		12,0
Bodenauflösung in Abhängigkeit von Flughöhe					
		7,2	100	500	3,6
				750	5,4
				1000	7,2
				1500	10,8
				2000	14,4

- Die Bodenauflösung ist umgekehrt proportional zur Brennweite: je kleiner die Brennweite, desto größer die aufgenommenen Bodenelemente und desto schlechter die Bodenauflösung.
- Die Bodenauflösung ist direkt proportional zur Flughöhe: je niedriger die Flughöhe, desto kleiner die aufgenommenen Bodenelemente und desto besser die Bodenauflösung.

Die folgenden Tabellen 4 und 5 verdeutlichen die Auswirkungen der Aufnahmeparameter am Beispiel konkreter Aufnahme- und Kamerakonfigurationen. So ist Tabelle 4 zu entnehmen, mit welcher Flughöhe die jeweilige Kamera geflogen werden muss, um einheitlich eine GSD von 12 cm für *panchromatisches* Bildmaterial zu erzielen.

Tabelle 4: Faktoren der Bodenauflösung – zum Zusammenhang von Pixelgröße, Brennweite und Flughöhe für *panchromatische* Sensoren

	DMC	DMC II 250	UltraCam D	UltraCam X	UltraCam Xp
Bildpixelgröße	12 µm	5,6 µm	9 µm	7,2 µm	6 µm
Brennweite	120 mm	112 mm	100 mm	100 mm	100 mm
Flughöhe	1200 m	2400 m	1333 m	1666 m	2000 m
Bodenauflösung (GSD)	12 cm				

Tabelle 5 zeigt, wie groß die GSD bei den in Tabelle 4 ausgewiesenen Flughöhen für *multispektrales Bildmaterial* ausfällt, wobei – der Befliegungspraxis entsprechend – davon ausgegangen wird, dass die panchromatischen und multispektralen Bilder zeitgleich in einem Bildflug aufgezeichnet werden. Wie die Werte unterstreichen, ist die GSD für alle Kameratypen im multispektralen Aufnahmemodus durchgehend mindestens dreimal schlechter als im panchromatischen. Wenn dennoch von GEObasis NRW für multispektrales wie für panchromatisches Bildmaterial die gleiche GSD von 20 cm ausgewiesen und Bilder in entsprechender Auflösung angeboten werden, so ist dies das Ergebnis entsprechender zielgerichteter Verfahren der Bildaufbereitung und -verbesserung (z.B. *pan-sharpening*; s. dazu u.a. Schiewe/Ehlers, 2004).

Tabelle 5: Faktoren der Bodenauflösung – zum Zusammenhang von Pixelgröße, Brennweite und Flughöhe für *multispektrale* Sensoren

	DMC	DMC II 250	UltraCam D	UltraCam X	UltraCam Xp
Bildpixelgröße	12 µm	7,2 µm	9 µm	7,2 µm	6 µm
Brennweite	25 mm	45 mm	28 mm	33 mm	33 mm
Flughöhe	1200 m	2400 m	1333 m	1666 m	2000 m
Bodenauflösung (GSD)	57,6 cm	38,4 cm	48,8 cm	36,3 cm	36,4 cm

3.1.2 Digitalisierte Luftbilder

Wie einleitend zu Kapitel 3.1 dargelegt, sollen – zur besseren Unterscheidung von *unmittelbar* digital aufgenommenen Luftbildern – die *mittelbar* durch das Scannen analoger photographischer Luftbilder entstandenen Bilddatensätze als *digitalisierte Luftbilder* bezeichnet werden.

Zur *Herstellung* digitalisierter Luftbilder sind als *Scanvorlagen* – wenn immer möglich – die Original-Filmnegative des auszuwertenden Bildmaterials heranzuziehen, da diese ein höheres photographisches Auflösungsvermögen aufweisen als die klassischen, meistens zur Auswertung benutzten Kontakt-Papierkopien (vgl. Redecker, 2008).

Um die Luftbilder ohne (möglicherweise) auswertungsrelevante Qualitätsverluste zu scannen, sollten gemäß den in DIN 18740-4 festgelegten „Anforderungen an das gescannte Luftbild“ grundsätzlich spezielle *photogrammetrische Scanner* eingesetzt werden. Sie gewährleisten nicht nur eine optimale geometrische Auflösung und Genauigkeit, sondern auch eine weitestgehend vorlagentreue Wiedergabe der Grauwerte des Bildoriginals, also eine angemessene photographische Qualität (s. auch Neumann, 2005). Allerdings verfügen mittlerweile auch hochwertige *Flachbett-Desktopscanner* über ein beachtliches Leistungsvermögen. Daher ist bei der multitemporalen Auswertung von Luftbildern zur Verdachtsflächenerfassung abzuwägen, ob tatsächlich photogrammetrische Scanner gemäß DIN 18740-2 zum Digitalisieren der Bilder eingesetzt werden sollen oder müssen oder ob auch ein leistungsfähiger Büros scanner den fallspezifischen Anforderungen zu genügen vermag. In jedem Fall ist sicherzustellen, dass die Luftbilder in einem Durchgang vollständig gescannt werden können, um bei zu kleiner Scanfläche anschließend erforderliche Bildmontagen und die damit zusammenhängenden Fehlerquellen zu vermeiden. In der Regel wird daher mindestens das Format DIN A3 (z.B. für 23 x 23 cm Luftbilder) einzusetzen sein. Ist ein photogrammetrischer Scanner vorhanden, sollte verständlicherweise damit gearbeitet werden. Ansonsten wird man bei der Verdachtsflächenerfassung im Normalfall auf die Verwendung photogrammetrischer Scanner verzichten können, da die hiermit erzielbare höhere Bilddatenqualität angesichts der eingeschränkten geometrischen bzw. photographischen Qualität mancher historischer Luftbilder sowie der Anforderungen an die Genauigkeit der Verdachtsflächenkartierungen kaum den (durch die Geräte-Anschaffungskosten bedingten) höheren finanziellen Aufwand rechtfertigt.

Als grundlegendes Problem ist in der *Praxis des Scannens* der analogen Luftbildvorlagen die Frage nach dem *Maß der geometrischen Scanauflösung*, d.h. nach der zu realisierenden Größe der Bildelemente, zu klären. Diese wird in der digitalen Luftbilddauswertung in der Regel durch die Kantenlänge der Bildelemente in μm , und nicht, wie im Druckgewerbe und Desktop Publishing (DTP) üblich, mit *dots per inch* (dpi), angegeben. Die einschlägigen Archive und Sammlungen für erfassungsrelevante Luftbilder aus Nordrhein-Westfalen (vgl. nachfolgend Kap. 3.2) stellen das historische Bildmaterial überwiegend in einer Scanauflösung von 1.200 dpi, teilweise allerdings auch kleiner (z.B. 800 oder 1.000 dpi) zur Verfügung. Die Umrechnung der Scanauflösung von dpi in μm und umgekehrt verdeutlicht Abbildung 4.

Liegen die Luftbilder (noch) nicht als digitale Datensätze vor, so dass analoges Bildmaterial zu digitalisieren ist, stellt sich die Frage, in welcher *Auflösung* zweckmäßigerweise *gescannt* werden soll. Generell wird man bestrebt sein, eine möglichst hohe geometrische Auflösung, d.h. möglichst kleine Pixel und eine entsprechend hohe Bodenauflösung, zu erzielen. Dabei sind in der Auswertungspraxis zwei Aspekte zu berücksichtigen und abzuwägen:

1. die geometrische Auflösung der analogen photographischen Scanvorlagen sowie
2. die Dateigröße der Bilddatensätze und deren Handhabbarkeit.

Scanauflösung digitaler Luftbilder	
in dpi: Anzahl der Pixel (n) pro inch [= n / 2,54 cm]	
in μm : Kantenlänge [s_0 der Pixel; 1 μm = 0,001 mm]	
Umrechnung von dpi in μm:	
Scanauflösung s_0 (μm) = (2,54 cm/Anzahl n Pixel [dpi]) x 10.000	
Umrechnungsbeispiele:	
dpi	μm
1.200	21,2
1.000	25,4
800	31,8
400	63,5
300	84,7

Abbildung 4: Scanauflösung – Pixelgröße in dpi und μm (vgl. ALF, 2012)

Zu 1:

Das geometrische *Auflösungsvermögen der photographischen Scanvorlagen* wird üblicherweise mit der Maßzahl Linien oder (gleichbedeutend) Linienpaar pro Millimeter (L/mm bzw. Lp/mm) gekennzeichnet und anhand standardisierter Testtafeln mit Linienmustern unter genormten Bedingungen der Bildaufnahme, -aufbereitung und -auswertung bestimmt; ihr Wert entspricht jeweils der Anzahl der im Bild erkennbaren Testlinien (vgl. u.a. Hildebrandt, 1996). Beim ganz überwiegenden Teil des historischen (panchromatischen) Luftbildmaterials liegt das Auflösungsvermögen zwischen 20 bis 50 Lp/mm (vgl. auch Albertz, 2009). Dementsprechend ist, wie Abbildung 5 verdeutlicht, beim Scannen der Bilder, und zwar der Originalfilme, bestenfalls mit Pixelgrößen zwischen 25 μm und 10 μm zu rechnen. Praktisch bedeutet dies: Weil es nicht sinnvoll ist, beim Scannen eine über das Auflösungsvermögen der analog-photographischen Vorlage hinausgehende Auflösung zu wählen, sollte historisches Bildmaterial im Normalfall mit einer maximalen Scanauflösung von – je nach Vorlage – 10 μm (Originalfilm) bis 12,5 μm (Papierabzug) digitalisiert werden (vgl. auch Geosystems, 2009; ähnlich Graham et al., 2004), es sei denn, das Bildmaterial wurde nachweislich mit einem höher auflösenden Film aufgenommen.

Scanauflösung	
Auflösung photographische Bildvorlage:	
Linien/mm (l/mm) oder Linienpaare/mm (lp/mm)	
Auflösung eines Pixels:	
Kantenlänge s_0 in μm	
Umrechnung der Auflösung von lp/mm in μm	
$s_0 (\mu\text{m}) = 500 / \text{Anzahl } n \text{ lp/mm}$	
Umrechnungsbeispiele:	
Auflösung	
lp/mm	μm
20	25,0
30	16,7
40	12,5
50	10,0

Abbildung 5: Scanauflösung – photographische Auflösung in lp/mm und μm

Zu 2:

Wird mit einer hohen Auflösung gescannt, können – je nach Ausdehnung des Untersuchungsgebiets – sehr schnell umfangreiche Datenmengen entstehen (vgl. Tab. 6). Zwar verfügen mittlerweile auch Standard-PCs über hinreichend große Festplatten- wie auch Arbeitsspeicherkapazitäten. Dennoch können die normalerweise in der Praxis der Verdachtsflächenbearbeitung verfügbaren PC-Systeme bei größerem Dateiumfang – nach Geosystems (2009) bei Datenmengen ab 800 MB pro Bild – vor allem im Hinblick auf eine effektive Arbeitsgeschwindigkeit sehr schnell an die Grenzen ihres Leistungsvermögens kommen, wenn die Originalbilder mit allzu hoher Auflösung gescannt werden. Daher kann es im Einzelfall notwendig sein, abzuwägen zwischen einer theoretisch möglicherweise idealen, vorlagenspezifisch maximalen sowie einer bearbeitungstechnisch wie auch sachlich (noch) vertretbaren Scanauflösung. Bei der Entscheidung über die Scanauflösung sollte dann allerdings auch bedacht werden, dass die Auflösung und damit die Dateigröße bei Bedarf im Nachhinein verringert werden kann, eine nachträgliche Erhöhung der Auflösung ohne erneutes Scannen aber nicht möglich ist (vgl. auch Geosystems, 2009).

Neben der geometrischen ist die *radiometrische Auflösung* ein weiterer wesentlicher Faktor im Scanprozess. Um die Dynamik, d.h. den jeweiligen Tonwertumfang der photographischen Scanvorlagen, möglichst originalnah und differenziert zu erfassen, sollte generell mit einer Auflösung von 10 bis 12 Bit digitalisiert werden, auch wenn in der derzeitigen Praxis die Bildverarbeitung und -auswertung standardmäßig mit 8 Bit erfolgen. Hierzu wird dann die Auflösung der gescannten Datensätze auf 8 Bit verringert (vgl. Redecker, 2008).

Beim *Speichern der gescannten Daten* ist zu berücksichtigen, dass bei einer – im Hinblick auf die Datenarchivierung – möglicherweise wünschenswerten Datenkompression auswertungsrelevante geometrische wie auch radiometrische Informationen verlorengehen können. Solche Informationsverluste mögen – und werden – bei einer qualitativ-beschreibenden Bildauswertung keine oder nur in Sonderfällen, etwa bei qualitativ ohnehin schwächeren Kriegsluftbildern, eine Rolle spielen. Bei einer quantitativ-kartierenden Bildanalyse sind sie im Regelfall allerdings nicht hinzunehmen. Daher empfiehlt es sich, die Scanergebnisse generell in Datenformaten abzuspeichern, die eine verlustfreie Komprimierung ermöglichen, so z.B. im Tagged Image File Format (TIFF) mit der nicht verlustbehafteten LZW-Komprimierung oder im JPEG 2000 Format in der Einstellung „lossless“, die eine Datenkompression um den Faktor 3 bis 4 ermöglicht.

Tabelle 6: Scanauflösung und Dateigröße für ein Standardluftbild
23 x 23 cm; (nach Geosystems, 2009)

Auflösung in µm	Dateigröße (in MB) Schwarzweiß-Bild		Dateigröße (in MB) Echtfarbbild	
	8 Bit	16 Bit	8 Bit	16 Bit
5	2.156,6	4.313,2	6.450,9	12.939,7
10	539,0	1.078,3	1.612,7	3.234,9
12.5	345,0	690,1	1032,1	2.070,4
15	239,5	479,0	716,5	1.437,1
20	134,7	269,5	430,2	808,6
25	86,2	86,2	258,0	517,6
30	59,9	59,9	179,3	359,7
80	8,4	16,91	25,3	50,7

Kann (oder muss) in der Auswertungspraxis der Verdachtsflächenerfassung, wie dies vielfach der Fall ist, auf bereits *digital vorliegendes Luftbildmaterial* zurückgegriffen werden, sollten diese Bilddaten vorab kritisch nach den vorangehend angesprochenen Aspekten überprüft und bewertet werden, im Einzelnen:

- Art und Qualität der gescannten Original-Bildvorlagen (z.B. Originalfilm oder Papierabzüge, soweit möglich: Auflösungsvermögen (lp/mm) der zum Scannen benutzten Luftbildfilme bzw. – bei Papierkontaktkopien – des Kopiermaterials)
- Scanner-Typ und Scanmodus (geometrische Auflösung, radiometrische Auflösung, Scanparameter)
- Datenspeicherung

Lässt die Überprüfung des gescannt vorliegenden Bildmaterials deutliche Mängel erkennen, so etwa eine unter den oben genannten Mindeststandards liegende Auflösung oder eine verlustbehaftete Datenkompression, sollten die Luftbilder – sofern möglich – erneut und nunmehr unter Beachtung der grundlegenden Qualitätsanforderungen gescannt werden. Dies gilt insbesondere, wenn sie nicht nur für eine qualitativ-beschreibende, sondern für eine quantitativ-kartierende multitemporale Auswertung herangezogen werden sollen.

3.2 Sammlungen erfassungsrelevanter Luftbilder in Nordrhein-Westfalen

Die Sammlungen, in denen das für die Bearbeitung von Altlastverdachtsflächen relevante Luftbildmaterial von NRW archiviert und zugänglich ist, sind in den einschlägigen Leitfäden der Landesumweltverwaltung mehrfach dokumentiert und erläutert worden. Eine aktuelle und umfassende Übersicht vermittelt das Kapitel 3.4.5 in der überarbeiteten und erweiterten zweiten Auflage der „Arbeitshilfe für flächendeckende Erhebungen über Altstandorte und Ablagerungen“ (LANUV NRW, 2013). Im Folgenden werden daher nur die grundlegenden Tatbestände der Verfügbarkeit von erfassungsrelevanten Luftbildern in NRW in zusammenfassender Übersicht vorgestellt.

Generell ist festzuhalten, dass in NRW – anders als in anderen Bundesländern – das erfassungsrelevante Luftbildmaterial *dezentral archiviert* und demzufolge auch in unterschiedlichen Archiven/Sammlungen zu finden und zu beziehen ist. Dabei ist sowohl räumlich-regional als auch zeitlich zu differenzieren (vgl. hierzu und zum Folgenden Tab. 7).

Tabelle 7: Erfassungsrelevante Luftbildbestände in NRW

Zeitspanne	Archiv/Luftbildsammlung					
	LArch	BArch	GEObasis NRW	LANUV NRW	RVR	NARA
Vorkriegsjahre						
Kriegsjahre 1939 – 1945/46						
frühe Nachkriegsjahre: bis Ende 1950er Jahre						
seit Anfang 1960er Jahre						
Erläuterungen: LArch: Landesarchiv NRW, Abt. Rheinland, Düsseldorf, Zwischenkriegsjahre: Bestände RW 0420, RW 0641, frühe Nachkriegsjahre: Bestand RW 0225 BArch: Bundesarchiv, Hauptstelle, Koblenz, Bestand: Bild 197 GEObasis NRW: vormals Landesvermessungsamt, heute: Reg. Bez. Köln, Abt. 07 LANUV NRW: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz in Nordrhein-Westfalen, Essen, Abt. 3, Bestand: BOMPIC mit Erweiterungen (TD-Bestand) RVR: Regionalverband Ruhr, Essen, Referat Geoinformationssysteme und Raumbearbeitung, Bestand: Luftbildsammlung NARA: National Archives and Record Administration, Washington DC/USA						

Räumlich-regional umfasst nur *eine* der Bildsammlungen, nämlich die des Regionalverbands Ruhr (*RVR*, Luftbilddaufnahmen aus praktisch allen Zeitspannen seit den Vorkriegsjahren bis heute. Darüber hinaus ist für das *RVR*-Gebiet aber auch der Rückgriff auf komplementäres Bildmaterial aus weiteren Befliegungen von den Kriegsjahren bis heute in allen anderen Bildsammlungen möglich – und empfehlenswert: vom Landesarchiv über das Bundesarchiv, die Bildarchive von *GEO*-basis NRW und des *LANUV* bis hin zu den *NARA*-Beständen. Mit an-

deren Worten: Es gibt kein anderes Gebiet in NRW, das durch historische Luftbildaufnahmen so gut, d.h. in einer so dichten Zeitschnittfolge, dokumentiert ist wie das Gebiet des RVR. Allerdings decken nicht alle überlieferten Zeitschnitte das gesamte Verbandsgebiet jeweils komplett ab.

Zeitlich ist die Archivierung des verfügbaren NRW-Luftbildmaterials deutlich differenzierter. Hier finden sich – jeweils über die RVR-Bildsammlung hinaus – Luftbilder aus den *Vorkriegsjahren* im Wesentlichen nur im Landesarchiv, Abt. Rheinland. Hauptfundorte für Luftbilder aus den *Kriegsjahren* sind – an erster Stelle – das LANUV mit dem sogen. BOMPIC-Bestand und dessen Erweiterungen sowie namentlich für die Zeitspanne Herbst 1944 bis in die erste Nachkriegszeit (Sommer 1946) die US-amerikanische NARA. Befliegungen aus der folgenden *frühen Nachkriegszeit*, d.h. ab eingangs der 1950er Jahre, sind nicht nur im Landesarchiv NRW, Abt. Rheinland, Düsseldorf, zu finden, sondern auch in der Hauptstelle des Bundesarchivs in Koblenz. Dazu ist anzumerken, dass es sich hierbei ganz überwiegend nicht um Parallelüberlieferungen, sondern um Bilder aus jeweils unterschiedlichen Befliegungen handelt. Wichtigster Fundort für Luftbilder aus den Messflügen, die seit den ausgehenden 1950er und *frühen 1960er Jahren* bis heute vor allem für Zwecke der Aktualisierung der amtlichen topographischen Kartenwerke durchgeführt wurden, ist die Landesluftbildsammlung von GEObasis NRW. Die hier verfügbaren Senkrecht-Reihenmessbilder decken praktisch alle Landesteile ab, und zwar zunächst in zeitlichen Abständen zwischen fünf bis sieben Jahren und mittlerweile drei Jahren.

Um das für eine multitemporale Luftbildauswertung zur Erfassung altlastverdächtiger Areale notwendige Bildmaterial zu *ermitteln*, sind bei entsprechender Bestandsdauer der altlastverdächtigen Nutzung(en) grundsätzlich *alle* vorgenannten Bildsammlungen als Fundorte für erfassungsrelevante Luftbilder in Betracht zu ziehen. So sollten sich auch bei Untersuchungsstandorten im Ruhrgebiet die Bildrecherchen nicht allein auf die RVR-Sammlung beschränken, da – wie oben dargelegt – auch in den übrigen Archiven weiteres relevantes und – je nach Verdachtsflächenentwicklung – aussagekräftigeres Bildmaterial zu finden ist.

Als *Hilfsmittel* zur Erleichterung und Beschleunigung der *Bildrecherchen* ist eine webbasierte *Findhilfe* der erfassungsrelevanten Luftbildbestände von Nordrhein-Westfalen erarbeitet worden (FeL NRW). Sie dokumentiert speziell das auf die oben genannten Archive verteilte Bildmaterial der frühen Befliegungsjahre ab 1939 bis ausgangs der 1950er Jahre und macht dieses damit für die Arbeit vor Ort leichter als bis dato zugänglich. Zuständige Behörden können den Zugang zur Findhilfe formlos beim LANUV, FB 32 per E-Mail beantragen (bompic@lanuv.nrw.de). Die seit eingangs der 1960er Jahre entstandenen Luftbilder sind in den Bildflugübersichten⁸ bzw. in den Zeitfolgekarteeien („Liste der Bildflüge“ auf Basis der DGK5) von GEObasis NRW dokumentiert und dort leicht und schnell zu ermitteln⁹.

⁸ Die Übersichten über die NRW-Bildflüge ab 2002 stehen digital zur Verfügung und sind auf der Webseite von GEObasis NRW einzusehen oder auch runterzuladen. Die älteren Bildflughnachweise werden von GEObasis NRW derzeit noch in analoger Form zur Verfügung gestellt; sie sollen zukünftig aber ebenfalls digital zugänglich gemacht werden.

⁹ Die DGK5-basierten Bildflug-Listen können bei GEObasis NRW angefordert werden; sie enthalten u.a. Angaben zu Bildflugnummer, Aufnahmedatum, (mittlerer) Maßstab, Überdeckung sowie bei Digital-Bildern Angaben zur Bodenauflösung, ferner zur Verfügbarkeit von Kalibrierungsprotokollen.

Der Gesamtbestand der verfügbaren Luftbilder sollte dokumentiert werden – mit den folgenden Angaben: Archive, die Bezeichnung der Befliegungen, die Bildnummern sowie – soweit zu ermitteln – auswertungsrelevante Metadaten: Aufnahmedatum, Flughöhe, Kammerkonstante/Brennweite, Maßstab, Längs- und ggf. Querüberdeckung.

3.3 Kriterien der Bildauswahl

Für die einzelfallbezogene Untersuchung einer gegenwartsnah stillgelegten Betriebsfläche, deren möglicherweise altlastverdächtige Nutzung bis in die Kriegs- und Vorkriegsjahre zurückreicht, werden sich in den vorangehend aufgeführten Bildarchiven und -sammlungen je nach Lage des betreffenden Standorts, ob im ländlichen oder im urban-industriellen Raum, Luftbilder aus wenigstens 20 – 25 und bis zu rund 50 und mehr Befliegungen finden (vgl. Tab. 8), wobei in der Regel die meisten Bildflüge pro Jahr auf die Kriegsjahre und hier insbesondere die zweite Jahreshälfte 1944 und die letzten Kriegsmonate 1945 entfallen.

Teils aus Zeit-Kostengründen, teils aus Sacherwägungen wird es normalerweise allerdings weder möglich noch notwendig sein, dieses insgesamt verfügbare Bildmaterial komplett in die Standortrecherche einzubeziehen, sondern es wird genügen, eine *Auswahl* zu berücksichtigen. Diese Auswahl sollte jedoch nicht zufällig sein, indem sie beispielsweise nur die – aus gleich welchen Gründen – vor Ort bereits vorliegenden Bilder umfasst. Vielmehr sind die Bilder möglichst *systematisch-gezielt auszuwählen*. Hierbei sind gleichermaßen objekt-, d.h. standortbezogene wie auch aufnahme-/bildbezogene Kriterien zu berücksichtigen.

Grundlegendes *objektbezogenes Kriterium* einer gezielten Luftbildauswertung ist die potentiell altlastrelevante Standortgeschichte und -dynamik: Die Abfolge der Zeitschnitte sollte verständlicherweise nach Möglichkeit Luftbilder aus den Anfängen der kontaminationsverdächtigen Nutzung ebenso umfassen wie Bilder aus der Zeit des Endes dieser Nutzung. Liegt das Nutzungsende – gemessen am Fortführungszyklus der für die Ergebniskartierung vorgesehenen Kartenblätter – bereits länger zurück, empfiehlt es sich, auch Bilder der jüngsten Befliegung heranzuziehen, damit für die Ergebniskartierungen die topographischen Basiskarten überprüft und – nötigenfalls – aktualisiert werden können.

Um aus der Zeitspanne zwischen Nutzungsbeginn und -ende Befliegungen auszuwählen, ist es zwar naheliegend, aber methodisch meistens nicht sonderlich sachgerecht und zielführend, wenn rein schematisch konstante Zeitschnittabstände, etwa ein Jahrzehnt, festgelegt werden. Vielmehr sollten hier als weitere objektspezifische Kriterien zum einen die Dynamik der Standortentwicklung und zum anderen die generelle Dokumentations- und Quellenlage zum Tragen kommen.

Phasen besonderer *Entwicklungsdynamik* und tiefgreifender Veränderungen sind entweder aufgrund der Auswertung schriftlicher Quellen bekannt oder auch – zumindest in den wesentlichen Grundzügen – vergleichsweise einfach und schnell durch eine multitemporale Auswertung der berichtigten Ausgaben der Topographischen Karte 1:25.000 zu identifizieren und einzugrenzen (s. u.a. LANUV NRW, 2013., Kap. 3.3.3.4). *Lücken* in den erfassungsrelevanten *Quellenbeständen*, insbesondere in der Überlieferung schriftlicher Quellen und damit

Tabelle 8: Beispiele für die Verfügbarkeit von Luftbild-Zeitschnitten für die multitemporale Bildauswertung. Über den Bereich der jeweiligen DGK5 hinaus ist eine Pufferzone von rund 1 km berücksichtigt. Zusammenstellung mittels FeL NRW und nach den Bildfluglisten DGK5 von GEObasis NRW

Dortmund-Hörde Bereich DGK 5		Preußisch-Oldendorf Bereich DGK 5 –	
Befliegungen		Befliegungen	
Befliegungsjahr (>1 Bildflüge)	Archiv/ Sammlung	Befliegungsjahr (>1 Bildflüge)	Archiv/ Sammlung
1941	LANUV/BOMPIC	1941 (2)	LANUV/BOMPIC
1943 (2)	LANUV/BOMPIC	1944 (3)	LANUV/BOMPIC
1943 (2)	LANUV/TD	1944	NARA
1944 (7)	LANUV/BOMPIC	1945 (2)	LANUV/BOMPIC
1944	LANUV/TD	1945	NARA
1945 (11)	LANUV/BOMPIC	1955	BArch
1945 (3)	NARA	1958	BArch
1952	RVR	1965	GEObasis NRW
1954	BArch	1975	GEObasis NRW
1955	BArch	1983	GEObasis NRW
1956	LArch	1989	GEObasis NRW
1957	LArch	1992	GEObasis NRW
1958	LArch	1995	GEObasis NRW
1959	LArch	2000	GEObasis NRW
1959	LArch	2005	GEObasis NRW
1963	RVR	2008	GEObasis NRW
1966	RVR	2011	GEObasis NRW
1969	RVR		
1972	RVR		
1974	RVR		
1976	GEObasis NRW		
1976	RVR		
1983	GEObasis NRW		
1986	RVR		
1989	GEObasis NRW		
1991	RVR		
1996	GEObasis NRW		
1999	RVR		
2001 (2)	GEObasis NRW		
2006 (2)	GEObasis NRW		
2009	GEObasis NRW		
2012	GEObasis NRW		

Erläuterungen:
LANUV: Landesumweltamt, Bildbestände BOMPIC und TD (= Topographischer Dienst der Niederlande)
BArch: Bundesarchiv, Hauptsitz Koblenz
LArch: Landesarchiv NRW, Abteilung Rheinland, Düsseldorf
RVR: Regionalverband Ruhr
NARA: National Archives and Record Administration, Washington/DC
GEObasis NRW: Bezirksregierung Köln – Abteilung 7

auch in der Dokumentation der Nutzungsentwicklung, treten immer wieder auf. In der Erfassungspraxis betrifft dies namentlich die Kriegsjahre sowie die frühen Nachkriegsjahre mit der Beseitigung der Kriegsfolgeschäden und dem Wiederaufbau. Zugleich handelt es sich hier um eine Zeitspanne besonderer Dynamik mit oft massiven und weitreichenden altlastrelevanten Veränderungen. Demzufolge sind Luftbilder aus dem *Zeitschnitt Zweiter Weltkrieg* und *Aufbaujahre* unbedingt in die Bildauswahl einzubeziehen.

Ob man hier dann unter den nach *Bildmaßstab* und *-qualität* brauchbaren Kriegsluftbildern eine Auswahl trifft, sollte im Einzelfall – etwa aufgrund anderweitig vorliegender Erkenntnisse über die Häufigkeit von Luftangriffen auf den Untersuchungsstandort – entschieden werden. Vielfach mag es genügen, nur die jüngsten vor Kriegsende aufgenommenen Luftbilder auszuwerten, weil diese normalerweise – namentlich wenn sie in den letzten Kriegsmonaten von Januar/Februar bis April/Mai 1945 entstanden sind – das Maximum der Kriegsfolgeschäden dokumentieren. Ebenso kann es sich bei Altstandorten der Erhebungsklasse I (etwa Chemische Industrie) aber auch als zweckmäßig, ja notwendig erweisen, zusätzlich Bilder aus vorangegangenen Aufklärungsflügen heranzuziehen, um die möglichen direkten bzw. indirekten (z.B. mit provisorischen Reparaturen einhergehenden) kriegsspezifischen Kontaminationen umfassend nach Art, Ausmaß und Einwirkungsdauer zu ermitteln (s. auch MALBO 18, Kap. II.1.2.7).

Wichtigstes, weil grundlegendes *bildbezogenes Auswahlkriterium* ist die *Objekt- bzw. Objektdetailerkennbarkeit*, also die Frage, ob und inwieweit erfassungsrelevante Geländeobjekte und Objektelemente bzw. -zustände in den digitalen Luftbilddatensätzen unter Standard-Auswertungsbedingungen, d.h. am Bildschirm unter Ausnutzung der Möglichkeiten des kontinuierlichen Zoomens, visuell zu erkennen und anzusprechen und somit auch zu kartieren sind.

Ein wesentlicher Faktor ist hier im Zusammenspiel mit der Bild- bzw. Scanauflösung (s. Kap. 3.1.1 und 3.1.2) der *Luftbildmaßstab*. Tabelle 9 verdeutlicht: Je größer der Aufnahmemaßstab, desto besser bei gleicher Pixelgröße die Bodenauflösung (GSD) und desto besser die Objekt- und Detailerkennbarkeit erfassungsrelevanter Gegebenheiten und Zustände. Wenn

Tabelle 9: Luftbildmaßstab als Steuerungsfaktor der Bodenauflösung
(nach Geosystems, 2009)

Luftbild maßstab	Bodenauflösung GSD (in cm) bei Pixelgrößen von				
	10 µm	12,5 µm	15 µm	20 µm	40 µm
1 : 3.500	3,5	4,4	5,2	7,0	14,0
1 : 5.000	5,0	6,5	7,5	10,0	20,0
1 : 10.000	10,0	12,5	15,0	20,0	40,0
1 : 12.000	12,0	15,0	18,0	24,0	48,0
1 : 18.000	18,0	22,5	27,0	36,0	72,0
1 : 25.000	25,0	31,3	37,5	50,0	100,0
1 : 50.000	50,0	62,5	75,0	100,0	200,0

also die Findhilfen für eine erfassungsrelevante Zeitspanne Luftbilder aus Befliegungen unterschiedlicher Maßstäbe ausweisen, sollte jeweils die Befliegung mit dem größten Maßstab ausgewählt werden. Allerdings: Bei Kriegsluftbildern ist hier vorab zu klären, ob diese großmaßstäbige Befliegung keine Beeinträchtigungen durch Wolken, Qualm, Dunst usw. aufweist (s. nachfolgend Kap. 4.2.1). Zudem empfiehlt es sich, über einen Vergleich korrespondierender Bild- und Karten- bzw. Geländestrecken zu prüfen, ob bzw. inwieweit die in den Findhilfen angegebenen Maßstabszahlen tatsächlich zutreffen – was aus unterschiedlichen Gründen vor allem bei den Kriegsluftbildern nicht immer der Fall ist (s. MALBO 22, Anhänge III.4.2 und III.4.3).

Sind für einen nach Entwicklungsdynamik und/oder Quellenlage als „wichtig-kritisch“ einzustufenden Zeitraum, meistens die Kriegsjahre, keine größermaßstäbigen Luftbilder überliefert, können – und sollten – durchaus auch kleinermaßstäbige Bilder in die Auswertung einbezogen werden. Allerdings sind hier dann auch bei guter photographischer Aufnahmequalität anhand von Bildern $\leq 1:15.000$ und erst recht $\leq 1:25.000$ exakte Objektkartierungen nur noch eingeschränkt möglich (s. Kap. 5.1). In der Hauptsache können/sollten diese kleiner- und kleinmaßstäbigen Bilder daher primär zur qualitativ-deskriptiven Überprüfung anderer, vor allem schriftlicher Quellen eingesetzt werden –, und auch dabei ist wegen der eingeschränkten Detailerkennbarkeit Zurückhaltung und Vorsicht geboten.

4 Methoden und Techniken der digitalen Vorverarbeitung von Luftbildern

Bevor digitale Luftbilder thematisch ausgewertet und auf verdachtsflächenrelevante Nutzungssachverhalte hin analysiert werden können, erfordern sie zumeist eine Bildvorverarbeitung, d.h., sie sollten bzw. müssen *photographisch-radiometrisch* und/oder *geometrisch* aufbereitet und verändert, in Anlehnung an DIN 18716-2: „transformiert“ werden. Im Folgenden wird zunächst die zur digitalen Bildtransformation – wie dann im Weiteren auch zur Auswertung der transformierten Bilddatensätze – notwendige Arbeitsplatz-Ausstattung skizziert (Kap. 4.1). Die beiden Folgekapitel behandeln die auswertungsrelevanten photographisch-radiometrischen bzw. geometrischen Eigenschaften digitaler Luftbilder sowie die wichtigsten, zu deren Optimierung in der Praxis erprobten Methoden und Techniken der entsprechenden Bildvorverarbeitung (Kap. 4.2. und 4.3).

4.1 Hard- und Software-Ausstattung

Welche Hardware und Software erforderlich bzw. wünschenswert ist, um digitale Luftbilder auch digital auswerten zu können, hängt ganz wesentlich davon ab, welche der beiden grundlegenden Verfahrensvarianten der Bildauswertung im Einzelfall angewendet wird, d.h., ob die Luftbilder nur qualitativ-beschreibend oder quantitativ-kartierend ausgewertet werden sollen (vgl. Kap. 2.1).

4.1.1 Hardware

Bei beiden Ansätzen bewegen sich die *Anforderungen an die Hardwareplattform* generell im Wesentlichen im Rahmen einer heute üblichen leistungsfähigen Standard-PC-Ausstattung. Allerdings ist zu beachten, dass bei der Luftbildauswertung im Regelfall relativ große Datenmengen anfallen. So können – nicht nur bei ausgedehnteren Untersuchungsgebieten und/oder längeren kontaminations- und damit untersuchungsrelevanten Zeitspannen hohe Anforderungen an die Datenhaltung, den Arbeitsspeicher sowie die Rechenleistung des Systems erwachsen. Dementsprechend sind für eine flüssige Projektbearbeitung erforderlich

- eine hinreichend hohe Festplattenkapazität (von 500 – 750 GB) auf einer dedizierten Festplatte (nicht als Partition auf der Systemfestplatte) oder besser noch auf einem Halbleiterlaufwerk respektive Solid State Drive (SSD) mit möglichst kurzen Zugriffszeiten
- ein leistungsfähiger Arbeitsspeicher (von 4 bis 8 GB) und
- ein Prozessor mit 4 – 8 Rechenkernen.

Grundsätzlich zwar nicht notwendig, aber doch hilfreich und die Auswertungseffizienz steigend ist neben einem Monitor mit einer Bilddiagonalen von mindestens 56 cm (22 Zoll) ein zweiter großer Monitor, um Metadaten der Bilder, ferner Vergleichsbilder sowie „Sekundärdaten“ wie beispielsweise Pläne, Aktenauszüge u.ä. darzustellen.

Damit über die einfache zweidimensional-visuelle Betrachtung und Auswertung von Einzelbildern hinaus auch eine dreidimensional-stereoskopische Analyse von Bildmodellen möglich

ist, müssen die Grafikkarte 3D- und OpenGL-fähig sein, und es muss ein entsprechendes 3D-Betrachtungssystem zur Verfügung stehen. Hier kommen beispielsweise Bildschirme mit einer Bildwiederholungsrate von wenigstens 120 Hz in Kombination mit Shutterbrillen, 3D-Monitore mit Polarisationsbrillen oder andere Spezialmonitore in Betracht. Für Kartierungen im 3D-Stereomodell ist ferner zumindest eine Maus mit freilaufendem Scrollrad, besser eine Spezialmaus mit darüber hinaus frei belegbaren Funktionstasten erforderlich. Zu Sicherungszwecken, ist – sofern kein entsprechender Serverspeicherplatz zur Verfügung steht – eine externe Festplatte oder ein Netzwerkspeichersystem (NAS) zu empfehlen. Hier sollte soviel Speicherplatz zur Verfügung stehen, dass zum einen die unveränderten Ausgangsdaten und ggf. mehrere Generationen der Projektordner zumindest im inkrementellen Backup vorgehalten werden können.

4.1.2 Software

Sollen die Luftbilder lediglich zur Überprüfung von Erkenntnissen aus anderen Quellen der Erfassung dienen und sollen dazu nur Einzelluftbilder (Bildoriginale bzw. Orthophotos) *zweidimensional qualitativ-beschreibend* ausgewertet werden, ist als *Software* lediglich ein Programm erforderlich, das die *Visualisierung* der digitalen Luftbilddatensätze am Bildschirm ermöglicht. Zudem sollte das Programm über Kernfunktionen der visuellen Bilddarstellung und -betrachtung wie Zoomen und Verschieben (Panning) verfügen bzw. darüber hinaus wünschenswerterweise auch das Verändern von Darstellungsattributen, z.B. elementare Grauwertmanipulationen, oder das Ausmessen von Strecken ermöglichen. In der Praxis kommt hier unterschiedliche kommerzielle bzw. nicht-kommerzielle Software in Frage – von Programmen zur einfachen Bildbetrachtung (z.B. die bei nicht-kommerzieller Nutzung kostenfreie Software IrfanView) über Programme der Foto- und Bildbearbeitung bis hin zu Bildbetrachtungssoftware aus dem GIS-Bereich.

Um die Luftbilder als *dreidimensionale Geländemodelle* auswerten zu können, wie dies bei bestimmten qualitativ-beschreibenden Analysen zweckmäßig, ja notwendig und bei *quantitativ-kartierender Luftbilddauswertung* letztlich unabdingbar ist, muss Spezial-Software eingesetzt werden, die eine *stereoskopische Auswertung* ermöglicht. In der einfachsten Variante sind dies reine Bildbetrachtungsprogramme wie z.B. die Freeware StereoPhoto Maker. Sie geben die überlappend aufgenommenen Ausschnitte aufeinander folgender Luftbilder am Bildschirm so wieder, dass diese mit entsprechenden Betrachtungshilfen (z.B. Rot-Grün-Brillen, s. oben) als dreidimensionale Bilder wahrgenommen und somit realitätsnah *deskriptiv analysiert* werden können.

Sollen darüber hinaus kontaminationsverdächtige Bereiche *lagegenau kartiert* werden, muss Software eingesetzt werden, die es außer der einfachen stereoskopisch-visuellen Bildbetrachtung ermöglicht, die geometrischen Abbildungsfehler der Luftbilder zu kompensieren und die Bilder in ein Koordinatensystem einzupassen (vgl. nachfolgend Kap. 4.3). Hierzu gibt es eine Reihe leistungsfähiger kommerzieller Programmpakete, die neben den grundlegenden Modulen zur Bildorientierung und Triangulation sowie zur Stereokartierung auch Komponenten zur Erstellung von Orthophotos/-mosaiken bzw. Höhenmodellen umfassen. Mittlerweile finden sich allerdings auch erste Freeware- und Open Source-Programme, so z.B.

e-foto¹⁰, die in ihrem Leistungsumfang und ihrer Nutzerfreundlichkeit zwar (mehr oder minder deutlich) hinter dem der kommerziellen Programme zurückbleiben, im Normalfall aber doch eine durchaus sachgerechte und den Genauigkeitsanforderungen der Verdachtsflächenerfassung genügenden Luftbildkartierung gewährleisten. Waren die – unübersehbar – hohen Kosten für die zur visuellen Bildauswertung und -kartierung erforderliche Software bislang ein durchaus nachvollziehbarer Grund, digital vorliegende Luftbilder nicht digital, sondern weiterhin analog auszuwerten, so kann dies mittlerweile nicht mehr gelten: Der Open Source-Bereich (einschließlich GIS) bietet inzwischen genügend kostengünstige Lösungsalternativen, um digitalisierte oder digitale Luftbilder auch digital und dreidimensional-stereoskopisch auszuwerten, und zwar nicht nur qualitativ-beschreibend, sondern auch quantitativ-kartierend.

4.2 Photographisch-radiometrische Bildvorverarbeitung

Bei nahezu jeder multitemporalen Luftbildauswertung, die eine größere Zeitspanne umfasst, zeigt die Erfassungspraxis, dass die als erfassungsrelevant ermittelten und zur thematischen Auswertung und Kartierung ausgewählten Luftbilder mehr oder weniger deutlich ausgeprägte radiometrisch-photographische *Qualitätsunterschiede* aufweisen. Im Folgenden werden mögliche Beeinträchtigungen der photographischen Bildqualität sowie deren Ursachen beschrieben (Kap. 4.2.1), und es wird aufgezeigt, wie eine sachgerechte radiometrische Vorverarbeitung Qualitätsmängel beseitigen bzw. minimieren kann (Kap. 4.2.2), so dass erfassungsrelevante Bildinhalte besser, d.h. schneller und zuverlässiger, zu erkennen, zu erfassen und zu kartieren sind.

4.2.1 Photographisch-radiometrische Eigenschaften digitaler Luftbilder

Die photographisch-radiometrische Qualität von Luftbildern ist einer der grundlegenden und entscheidenden Steuerungsfaktoren für die Erkennbarkeit von Bildinhalten und damit für die Identifizierbarkeit von Objekten bzw. Objektdetails. Dies gilt nicht nur für analoge, sondern ebenso auch für digitale Luftbilder. Hierbei ist nach *Aufnahmezeiträumen* zu differenzieren:

- Vergleichsweise aktuelle, also in NRW seit etwa 2005/06 *digital aufgenommene Luftbilder* entsprechen im Regelfall den Anforderungen der DIN 18740-4 und weisen de facto keine erfassungsrelevanten photographisch-radiometrischen Beeinträchtigungen auf. Eine photographische Vorverarbeitung dieser Bilder ist daher normalerweise nicht notwendig.
- Ähnliches gilt im Großen und Ganzen für das *in und seit den 1950er Jahren entstandene Luftbildmaterial*. Für diese Aufnahmen wurden Fliegerfilme mit hoher Lichtempfindlichkeit sowie hohem geometrischen Auflösungsvermögen eingesetzt (s. Albertz, 2009; Albertz/Wiggenhagen, 2009), und das Bildmaterial wurde weitestgehend DIN-gerecht verarbeitet (s. DIN 18740-1, 4.4). Bilder mit Aufnahmemängeln, z.B. Wolken, Dunst oder unzulänglicher Ausleuchtung, sind hier normalerweise durch standardgemäße Aufnahmen aus zeitnahen Nachbefliegungen ersetzt worden. Generell muss

¹⁰ Zum Download unter <http://www.efoto.eng.uerj.br/>

bei diesen für die Auswertung digitalisierten Bildern aber beachtet werden, dass der Scanprozess radiometrisch-photographische Beeinträchtigungen verursacht haben kann und dementsprechend Qualitätsverbesserungen erforderlich sein können.

- Mit gravierenderen Beeinträchtigungen der photographisch-radiometrischen Bildqualität muss bei einem Teil der *Kriegsluftbilder* gerechnet werden (vgl. MALBO 22, Kap 4.4.). Hauptursachen sind hier:
 1. Die Bilder sind vielfach unter suboptimalen *Aufnahmebedingungen* entstanden, d.h. bei Dunst- und Nebelschleiern oder bei einer Geländeausleuchtung, die durch die Jahres- bzw. Tageszeit bedingt oder auch infolge massiver Wolken-schatten sehr niedrig war. Demzufolge erweisen sich nicht wenige Bilder in Teilbereichen oder auch vollständig als mehr oder minder dunkel und kontrastarm, so dass die Objekterkennbarkeit und -identifizierbarkeit für die betroffenen Bildbereiche entsprechend stark eingeschränkt sind (vgl. Abb. 6 und 7).
 2. Die Filme hatten zeitweilig ein schwächeres *Auflösungsvermögen* als damalige und erst recht als jüngere, d.h. seit den ausgehenden 1950er und 1960er Jahren eingesetzte, Fliegerfilme für Reihenmessaufnahmen. Zudem sind die Filme oft unter hohem Zeitdruck aufbereitet worden (Stanley, 1981) und daher im gesamten Bildfeld immer wieder (sehr) kontrastarm. Außerdem können die Papier-Kontakkopien infolge spezifischer technischer Rahmenbedingungen eine Randabschattung/Vignettierung, d.h. einen Lichtabfall zu den Rändern hin, aufweisen (vgl. Abb. 8).
 3. Das Bildmaterial, das heute in der Auswertungspraxis zur Verfügung steht, hat teilweise unter der in England wie vor allem in den USA zeitweilig unzulänglichen *Archivierung* gelitten. So kann ein Teil des in der Bildsammlung der

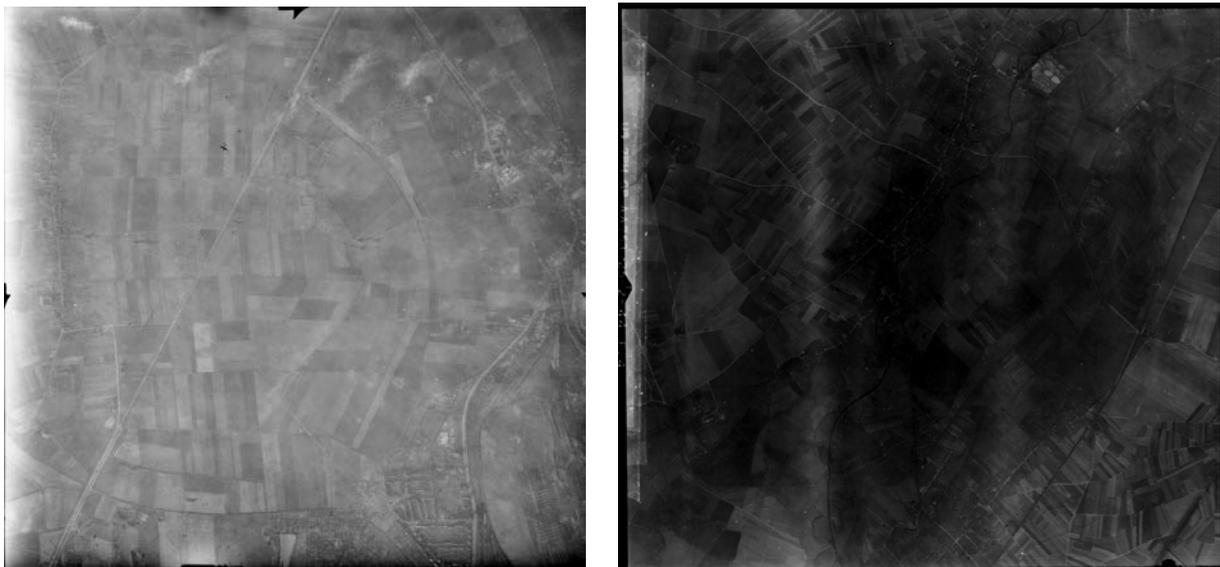


Abbildung 6: Beeinträchtigung der photographischen Qualität von Kriegsluftbildern; dunst-/nebel-/aufnahme- oder auch aufbereitungsbedingt helle bzw. dunkle kontrastarme Abzüge. Bildoriginale: 18 x 18 cm; LANUV NRW – BOMPIC-/TD-Bestand.



Abbildung 7: Beeinträchtigung der photographischen Qualität von Kriegsluftbildern durch Wolken, Wolkenschleier und -schatten. Im linken Bild: lockere Wolkenschleier; im Bild rechts: kleinere und größere Wolken sowie Wolkenschatten. In Teilen der Bilder ist die Identifizierung erfassungsrelevanter Objekte möglich, z.B. in der Abbildung links am rechten Bildrand: Flakstellung oder in der Abbildung rechts in der rechten unteren Ecke: Teilfläche eines Feldflugplatzes. Bildoriginale: 23 x 23 cm; LANUV NRW – BOMPIC-Bestand.



Abbildung 8: Beeinträchtigung der photographischen Qualität von Kriegsluftbildern durch Grauwertabfall zu den Rändern (Vignettierung). Sie beeinträchtigt nicht nur die Auswertung der Einzelbilder, sondern auch die Stereo-Bildbetrachtung, da die auf dem einen Stereobildpartner gut ausgeleuchteten, hellen Geländepartien im zweiten Stereobildpartner deutlich dunkler sind. Bildoriginale: 23 x 23 cm; NARA.

NARA archivierten Bildmaterials nicht mehr dupliziert werden, weil sich die Filme chemisch zersetzt haben.¹¹

4. Alle derzeit in nordrhein-westfälischen Sammlungen verfügbaren *Kriegsluftbilder*, also das gesamte Bildmaterial im BOMPIC-Bestand des LANUV, haben einen *Überlieferungs-* und *Kopierprozess* durchlaufen, der unvermeidlicherweise weitere Qualitätsverluste zur Folge hat. Bei den hier für die Auswertungspraxis bereitgestellten Scans handelt es sich um Bildkopien der vierten Generation, d.h. um Datensätze, die auf der Grundlage von Duplikatfilmen hergestellt wurden, welche ihrerseits nicht auf den Originalfilmen, sondern auf Positiv-Kontakkopien basieren. – Bei den NARA-Bildern ist die Überlieferungskette demgegenüber kürzer. Hier sind die digitalisierten Bilddatensätze Kopien der zweiten Generation, da in NARA die archivierten Original-Fliegerfilme gescannt werden.
5. Schließlich muss, wie bei allen digitalisierten Bilddatensätzen, mit den entsprechenden gerätespezifisch kleinen bis großen photographisch-radiometrischen Beeinträchtigungen gerechnet werden, wenn für die Digitalisierung kein photogrammetrischer Scanner nach DIN 18740-2, sondern ein – gemeinhin geometrisch und radiometrisch leistungsschwächerer – Desktopscanner eingesetzt wurde (s. vorangehend Kap. 3.1.2).

Kurz: Ein Teil der Kriegsluftbilder weist mehr oder weniger ausgeprägte photographisch-radiometrische Qualitätsmängel auf, die das Erkennen, Identifizieren und Lokalisieren von Bildobjekten und -objektdetails erschweren und einschränken können. In den meisten Fällen lassen sich diese Mängel allerdings durch entsprechende Maßnahmen der digitalen Bildaufbereitung und -verarbeitung minimieren oder beseitigen.

4.2.2 Methoden der photographisch-radiometrischen Bildverbesserung

Das *Ziel* photographisch-radiometrischer Bildverbesserung bei der Verdachtsflächenerfassung ist es, in digitaler Form vorliegende Luftbilddatensätze mit photographischen Unzulänglichkeiten gleich welcher Ursache so zu optimieren, dass eine zuverlässige und zügige *visuelle Bildanalyse* zur Ermittlung und – gegebenenfalls – Kartierung altlastrelevanter Objekte und Tatbestände möglich ist (s. auch DIN 18716-2, 4.1.1). *Methodisch* erfordert dies generell *radiometrische Transformationen*, d.h. Veränderungen der Grauwerte in den digitalen Ausgangsbildern. Dabei wird in der Bearbeitungspraxis üblicherweise unterschieden zwischen

1. Histogrammoperationen und
2. Filteroperationen.

Die diesen beiden Verfahrenskategorien zuzuordnenden Einzelmethode der radiometrischen Bildverbesserung sind mit jeder *Standardsoftware* zur Bildverarbeitung bzw. zur (photogrammetrischen) Luftbilddauswertung umzusetzen. Im Folgenden sollen lediglich die Ver-

¹¹ Die NARA-Findhilfen der Kriegsluftbilder weisen für das Gebiet von NRW rund 40.000 Bilder aus. Davon sind allerdings ca. 16.500, also etwas über 40 %, nicht mehr lieferbar, weil die Archivierung unter langjährig unzulänglichen Bedingungen die Filme de facto zerstört hat.

fahren der *photographisch-radiometrischen Aufbereitung* historischer Luftbilder skizziert werden, die in der *Praxis* der Verdachtsflächenerfassung als *wesentliche*, weil grundlegend anzusehen sind. Ausführlichere und umfassendere Darstellungen der Aufbereitungsverfahren finden sich in einschlägigen Lehrbüchern zur (digitalen) Luft- und Satellitenbilddauswertung (z.B. Hildebrandt, 1996; Jensen, 2004) bzw. zur digitalen Bildverarbeitung (z.B. Richter/Teichert, 2009; Richards/Jia, 2006; Jähne, 2005).

Zu 1: Histogrammoperationen

Idealerweise hat ein mit 8 Bit radiometrischer Auflösung gespeichertes Luftbild zwischen weiß (maximaler Helligkeit) und schwarz (minimaler Helligkeit) einen Kontrastumfang von 256 Grauwerten/-tönen.¹² Bei den in der Auswertungspraxis verfügbaren digitalen Luftbildern, hier insbesondere bei den Scans älterer historischer Bilder, ist dies allerdings wenn überhaupt, dann nur (sehr) selten der Fall. Vielmehr werden, wie die Histogramme der Bilder mit der Häufigkeitsverteilung der Grauwerte zeigen (vgl. bspw. Abb. 9), meistens nur einzelne, mehr oder weniger breite Ausschnitte des gesamten Grautonspektrums genutzt. Dementsprechend erweisen sich die Bilder vielfach als (zu) hell oder (zu) dunkel und mithin (zu) kontrastarm. Hier setzen die Verfahren der Histogrammoperationen an: Auf der Grundlage der Grauwertstatistik des Originalbildes¹³ werden mittels geeigneter Transferfunktionen den einzelnen Bildpixeln neue Grauwerte zugewiesen, so dass nunmehr das gesamte oder zumindest ein deutlich breiteres Grautonspektrum genutzt wird, um ein kontrastoptimiertes Ausgabebild für die Auswertung zu erhalten.

Unter den Histogrammoperationen, die normalerweise als bildverbessernde Maßnahmen eingesetzt werden, sind in der Praxis der luftbildgestützten Verdachtsflächenerfassung die beiden folgenden Verfahren als Standardansätze anzusehen:

- *Lineare Kontrastverstärkung/Histogrammstreckung* (Abb. 9): Sämtliche im Eingabebild vorhandenen Grautonwerte werden gleichmäßig auf den Gesamtwertebereich zwischen 0 und 255 verteilt.
- *Histogrammausgleich* (Abb. 10): Die Grauwerte des Eingabebildes werden nicht gleichmäßig-linear, sondern entsprechend ihrer Häufigkeit auf den Gesamtgrauwertebereich verteilt. Dadurch wird der Histogrammbereich mit den häufigsten Werten stärker gestreckt, also kontrastreicher wiedergegeben als die Bereiche mit niedrigen Häufigkeitswerten, die u.U. eine „Komprimierung“ und Kontrastreduzierung erfahren.

Die vorgenannten (wie auch einige weitere) Verfahren der Kontrastverbesserung betreffen und verändern jeweils die Grauwertdynamik und den Kontrastumfang des *gesamten Eingab-*

¹² Ein mit 16 Bit Auflösung digitalisiertes Bild umfasst 65.536 Grautonabstufungen. Da das menschliche Auge Grautondifferenzen nur in begrenztem Umfang wahrzunehmen vermag, wird i.d.R. nur mit einer 8-Bit-Auflösung gearbeitet. Bei bestimmten Maßnahmen der radiometrischen Bildtransformation, so etwa bei einer Kontraststreckung, können hieraus im Vergleich zur einer 16-Bit-Bildtiefe allerdings Informationsverluste resultieren (s. Redecker, 2008).

¹³ In der Praxis ist darauf zu achten, dass die Grauwertstatistik allein die Grauwertverteilung des Bildfeldes berücksichtigt. Das heißt, Bildrahmen und Bildrandleiste sind auszuschließen (praktisch: abzuschneiden), da sie die auswertungsrelevante Grauwertverteilung verfälschen würden. Zudem ist bei den Histogramm- wie auch bei den Filteroperationen zu beachten, dass die Aufbereitungsergebnisse auch von der Auflösung der Bilder abhängen und dementsprechend variieren können.

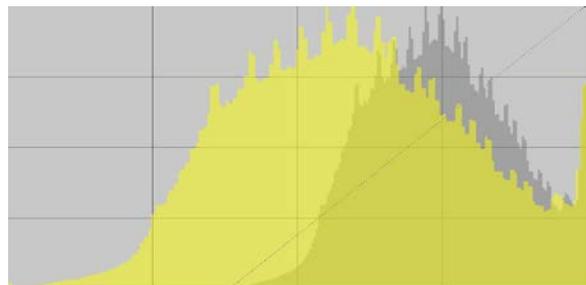
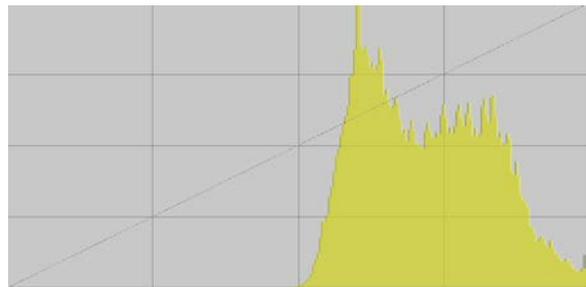


Abbildung 9: Grundlegende Verfahren der photographischen Bildverbesserung – lineare Kontrastverstärkung/Histogrammstreckung. Die Abbildungen oben zeigen das zu helle und kontrastarme Originalbild mit dem zugehörigen Histogramm, d.h. der Häufigkeitsverteilung der Grauwerte, die auf einen relativ engen Bereich des möglichen Spektrums der Grauwerte zwischen 0 und 255 beschränkt ist. Die Abbildung links unten verdeutlicht die Auswirkungen einer gleichmäßigen linearen Spreizung der Grauwerte (hier zwischen 70 und 255) auf das Gesamtspektrum von 0 bis 255; rechts unten: das zugehörige Histogramm. Bildoriginal: 18 x 18 cm; Bildvorlage: LANUV NRW – TD-Bestand.

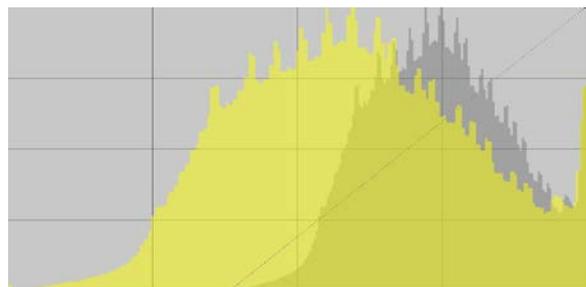
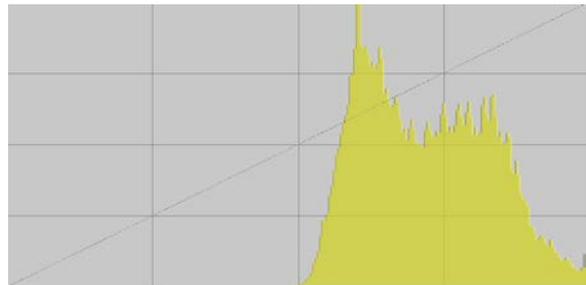


Abbildung 10: Grundlegende Verfahren der photographischen Bildverbesserung – Histogrammausgleich. Das Bild links oben sowie das Histogramm sind identisch mit Abbildung 9. Das Ergebnisbild (links unten) zeigt eine insgesamt deutlich stärkere Differenzierung der Grauwerte, und zwar insbesondere jener – mittleren – Grautöne, die, wie dem Histogramm zu entnehmen, im Bildoriginal am häufigsten vertreten sind. Bildoriginal: 18 x 18 cm; Bildvorlage: LANUV NRW – TD-Bestand.

bebildes. Räumliche Grautonunterschiede *innerhalb* des Bildes, wie sie durch Dunst und Wolken bzw. entsprechende Schatten oder durch eine unzulängliche Filmentwicklung oder das Kopieren der Bilder entstanden sein können (s. Kap. 4.2.1), bleiben unberücksichtigt und beeinträchtigen u.U. das Ergebnis der linearen Kontrastverbesserung bzw. des Histogramm-ausgleichs, wenn die innerbildliche räumliche Grauwert-Inhomogenität nicht beseitigt oder zumindest minimiert wird. Hierzu kann das Verfahren des Dodging eingesetzt werden.

- *Dodging* (Kontrastausgleich) ist – meistens mit dem sogenannten *Burning* kombiniert – ein aus der analogen Photolabortechnik bekanntes Verfahren, bei dem überhellte (überbelichtete) Bereiche „abgedunkelt“ und – per *Burning* – überdunkelte (unterbelichtete) Bereiche „aufgehellt“ werden. Beides ist mittlerweile nicht nur mit handelsüblichen Bildverarbeitungsprogrammen, sondern dank entsprechender Werkzeuge zur Bildverbesserung in photogrammetrischen Softwareprogrammen auch digital zu realisieren (s. Abb. 11). Dabei werden die Eingabebilder in – je nach Kontrastausprägung im Bild – kleinräumigere oder großräumigere Kacheln zerlegt. Es werden deren Grauwertdurchschnitte sowie die Varianzen/Standardabweichungen berechnet und auf deren Grundlage dann die Kontrastdifferenzen der unterschiedlich ausgeleuchteten Bildbereiche ausgeglichen und einander angeglichen.

Zu 2: Filteroperationen

Wie bei den vorangehend skizzierten Punktoperationen zur Bildverbesserung werden auch bei den umgebungsbezogenen Verfahren die originären Grauwerte der Pixel des Eingabebildes¹⁴ verändert – dies nun allerdings unter Einbezug von (örtlich) *benachbarten Pixeln* in Form eines sogenannten digitalen Filters unterschiedlicher Größe (vgl. Abb. 12): Das Filter umfasst jeweils eine ungerade Zahl von Pixeln und kann in seiner Größe, der „Filterregion“, variieren, z.B. 3 x 3, 5 x 5, 7 x 7 Pixel. Es läuft zeilenweise über alle Pixel des gesamten Eingabebildes. Für jedes Pixel des Ausgabebildes wird aus den Grauwerten innerhalb einer Filterregion um das entsprechende Pixel im ursprünglichen Bild gemäß den Koeffizienten der verwendeten Filtermatrix ein neuer Grauwert berechnet.¹⁵

Je nach Filteralgorithmus – und der damit erzielten Grauwertveränderung – sind Tiefpassfilter und Hochpassfilter zu unterscheiden. *Tiefpassfilter* dämpfen die hohen Ortsfrequenzen, d.h. große kleinräumliche Grauwertunterschiede innerhalb der Zeilen bzw. Spalten des Eingabebildes, und verstärken die niedrigen Ortsfrequenzen. Damit erfolgt eine Glättung der Grauwertunterschiede bzw. eine Weichzeichnung des Bildes. *Hochpassfilter* verstärken dagegen die hohen Ortsfrequenzen und dämpfen die niedrigen Ortsfrequenzen. Dadurch werden Grauwertunterschiede betont bzw. Kontraste verstärkt.

¹⁴ Auch hier ist – wie schon vorangehend (Fußnote 14) angemerkt – allein das Bildfeld ohne Bildrahmen und Bildrandleiste zu berücksichtigen.

¹⁵ Verständlicherweise können die Pixel der Bildränder durch Filteroperationen nicht modifiziert werden. Zur Lösung dieses Problem gibt es verschiedene Möglichkeiten (s. z.B. Richter/Teichert, 2009). In der Praxis der Verdachtsflächenerfassung erscheint es zweckmäßig, im Ausgabebild die – je nach Größe der Filterregion unterschiedlich großen – Zeilen und Spalten des Bildrandes wegzulassen oder die ursprünglichen Grauwerte der Eingabebilder zu übernehmen.

In der einfachsten (und geläufigsten) *Tiefpass-Filteroperation* wird für jedes Pixel des Eingabebildes (die Randpixel ausgenommen) das arithmetische Mittel aller Pixel-Grauwerte der Filterregion errechnet und dem jeweiligen zentralen Pixel als neuer Grauwert zugeordnet (gleitende Mittelwertbildung). Das Ergebnis ist eine Kontrastverringering, die mit der Größe der gewählten Filterregion zunimmt. Im Vergleich zum Eingangsbild erscheint das Ausgabebild „weicher“ und in den ursprünglichen Kontrasten „geglättet“, so dass die Tiefpassfilter auch als Glättungsfilter bezeichnet werden. In der Auswertungspraxis ist beim Einsatz von

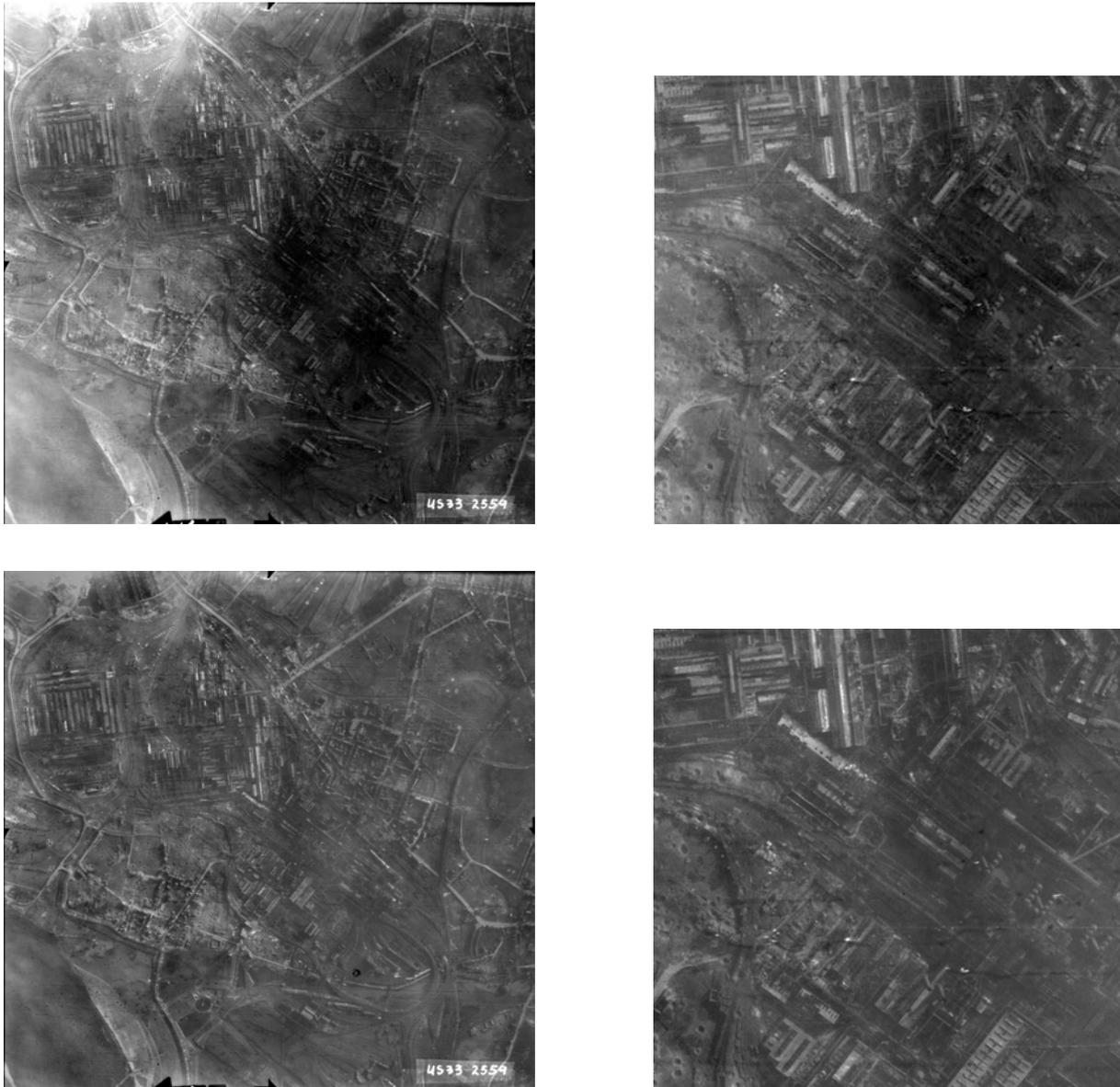


Abbildung 11: Grundlegende Ansätze der photographischen Bildverbesserung – Dodging. Das Originalbild (oben links; Ausschnitt: oben rechts) weist augenfällige Grauwertunterschiede auf, die in der Hauptsache durch Dunstschleier und Wolken sowie durch Wolken-schatten verursacht sind, aber auch durch den Verarbeitungsprozess bedingt sein können. Durch Dodging können, wie das Ausgabebild (unten links; Ausschnitt: unten rechts) verdeutlicht, die Grauwertdifferenzen verringert, bei weniger starker Ausprägung als in diesem Beispiel auch beseitigt werden. Bildoriginal: 18 x 18 cm; LANUV NRW – TD-Bestand.

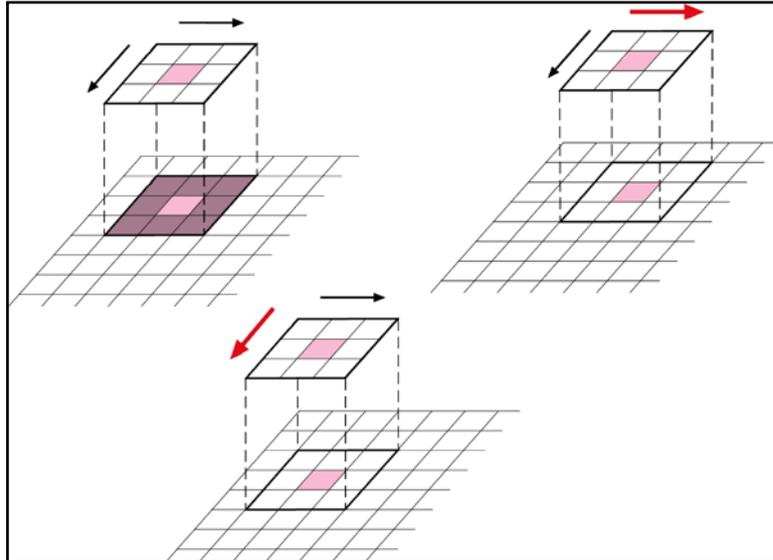


Abbildung 12: Prinzip der Filteroperationen bei der photographisch-radiometrischen Bildvorverarbeitung. Die Abbildung verdeutlicht die Größe der Filterregion/-matrix (hier 3 x 3 Pixel) sowie die Filterwanderung in Spalten- und Zeilenrichtung zur Ermittlung des „neuen“ Grautonwertes der jeweiligen zentralen Pixel.

Tiefpassfiltern zu beachten, dass durch das Mitteln der Grauwerte zwar unerwünschte kleinere Bildstörungen (Artefakte/Rauschen) beseitigt oder zumindest in ihrer optisch-visuellen Wirkung abgeschwächt werden. Ebenso ist aber zu beachten, dass kleinere Objekte bzw. Objektdetails mit wenigen Pixeln Ausdehnung und nur geringfügigen Grautonunterschieden schlechter zu erkennen und somit auch schwieriger – wenn denn überhaupt (noch) – zu erkennen sind. Demgemäß kommt in der Praxis der luftbildgestützten Verdachtsflächenerfassung der Einsatz von Tiefpassfiltern normalerweise nicht in Betracht.

Hochpassfiltern liegt mathematisch das Differenzieren der Luftbilder zugrunde, d.h. die Ableitung einer Bildfunktion (s. u.a. Kraus, 1990; Richter/Teichert, 2009). Dabei sind Filter, die aus der ersten Ableitung der Differentialoperationen resultieren, *richtungsabhängig* und Filter, die auf der zweiten Ableitung beruhen, *richtungsunabhängig*. Beide lassen jeweils Objektumrisse und Strukturen, die mit engräumig-abrupten Grauwertübergängen und -sprüngen einhergehen, deutlicher hervortreten (Kantenverstärkung bzw. Kantenerkennung/-extraktion). Sie sind daher einerseits recht rauschempfindlich, verstärken also auch geringfügige Abbildungsstörungen und können damit die Bildauswertung u.U. erschweren. Andererseits tragen sie dazu bei, dass kleinere Bildobjekte und Objektdetails deutlicher sichtbar und leichter erkennbar werden und das Eingabebild insgesamt „geschärft“ wird (vgl. Abb. 13).

Ein Verfahren, das sowohl eine Bildschärfung als auch den Ausgleich von Dunst- und Beleuchtungsunterschieden ermöglicht, ist das der Unschärfmaskierung (vgl. Abb. 14). Hierbei wird zunächst das Eingabebild durch Tiefpassfilterung „weichgezeichnet“, d.h. geglättet. Anschließend werden die Grauwerte der so entstandenen „unschärfen Maske“ mit den Werten des Originalbildes zu einem neuen – nun „schärferen“ – Ergebnisbild verrechnet.

Vielfach kann es sich zur Vorbereitung der Bildauswertung auch als zweckmäßig erweisen, zunächst zur Verbesserung der Qualität des Ausgangsbildes ein erstes radiometrisch-photographisches Verfahren der Bildoptimierung einzusetzen und dann in einem weiteren Arbeitsschritt ein zweites Verfahren. So ist es etwa bei stärkeren, etwa durch Dunst und Wolken/Wolkenschatten verursachten Grauwertunterschieden durchaus sinnvoll, das Bild zunächst einem Dodging zu unterziehen und dieses Bild – als „Zwischenprodukt“ im Aufbereitungsprozess – dann mit einem Filter zur Kantenverstärkung oder einer unscharfen Maske

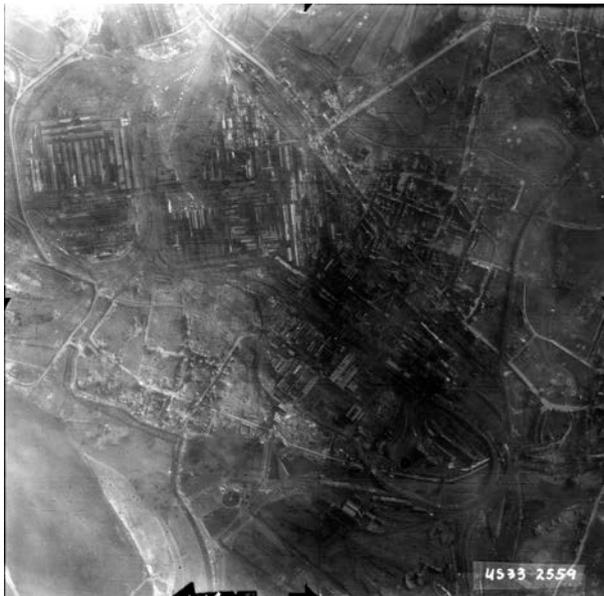


Abbildung 13: Beispiel einer photographischen Bildverarbeitung mit Hochpassfilter. Das Originalbild (oben links) ist mit einem 9 x 9-Filter zur Kantenverstärkung bearbeitet worden. Wie insbesondere im Vergleich der beiden Bildausschnitte (jeweils rechts) zu erkennen ist, erscheint das bearbeitete Bild (unten) insgesamt etwas schärfer. Um die Wiedergabe noch mehr zu „schärfen“, müsste eine größere Filtermatrix eingesetzt werden. Allerdings würden dann auch kleinere aufnahme- oder scanbedingte Störungen deutlicher hervortreten. Bildoriginal: 18 x 18 cm; LANUV NRW – TD-Bestand.

zu bearbeiten (vgl. Abb. 15). Generell ist – vor allem bei einer mehrere radiometrische Verbesserungsverfahren umfassenden Luftbildbearbeitung – sorgfältig darauf zu achten, dass hier keine identifizierungsrelevanten Bildstrukturen unterdrückt werden und verloren gehen. Um dies zu gewährleisten, empfiehlt sich im Verlauf der Bearbeitung ein kontinuierlich-kritischer Vergleich mit den Ausgangsbildern.

Ein speziell bei der Auswertung von Kriegsluftbildern immer wieder auftretendes Problem ist das *Erkennen erfassungsrelevanter Bildinhalte bei Bewölkung*. Praktisch ist dieses Problem

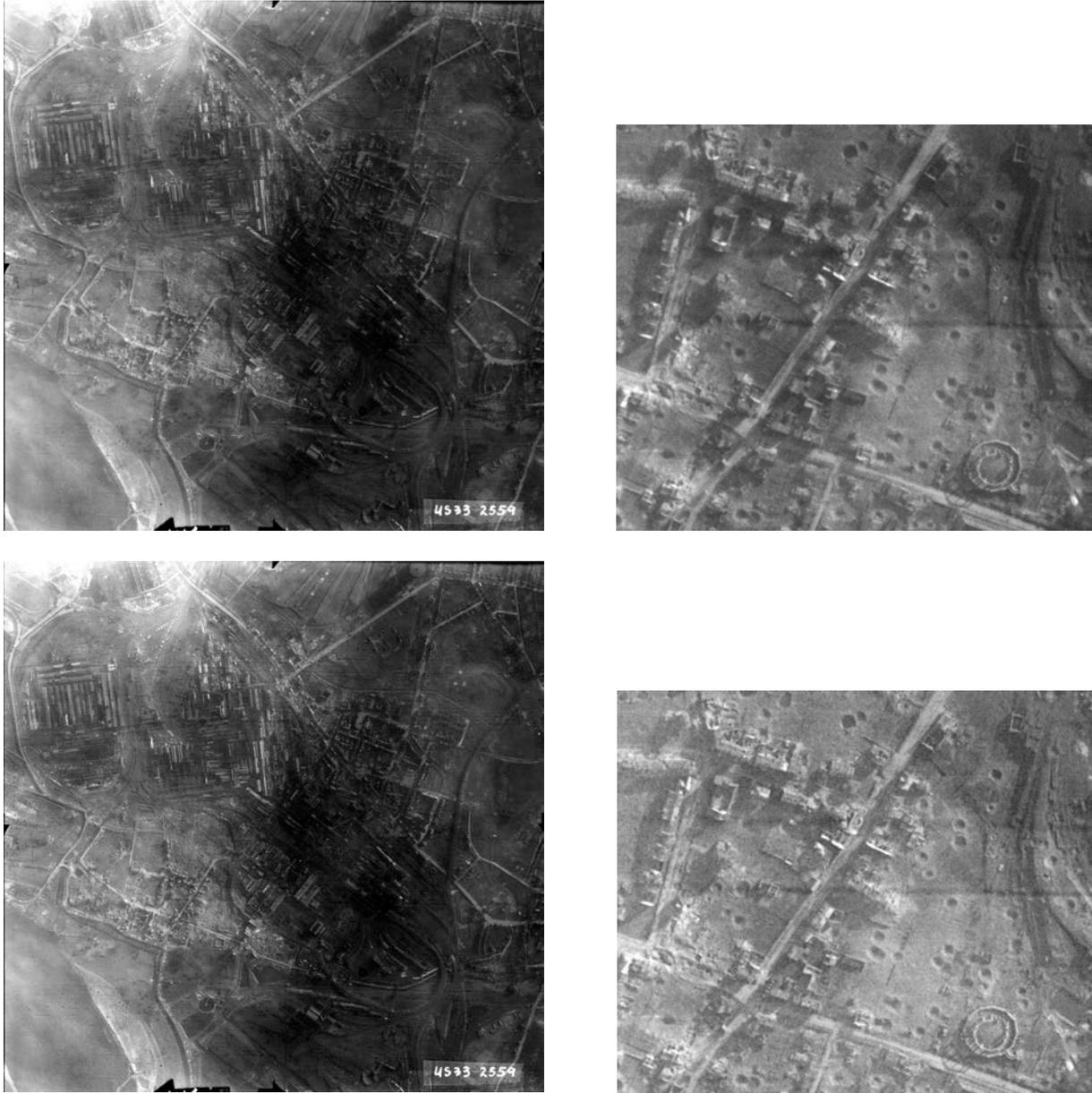


Abbildung 14: Beispiel einer photographischen Bildvorverarbeitung durch Unschärfmaskierung. Das Originalbild (oben) weist deutliche Grauwertunterschiede auf. Diese werden durch den Einsatz der „unscharfen Maskierung“ (mit einem kleinen Filter) mehr oder weniger abgeschwächt (im Beispiel nur geringfügig). Zugleich wird das Bild in einem weiteren Aufbereitungsschritt mit einem großen Filter durch Kantenverstärkung „geschärft“ (vgl. Ausschnitte). Bildoriginal: 18 x 18 cm; LANUV NRW –TD-Bestand.

nicht zu lösen, wenn die Luftbilder eine weitestgehend geschlossene Wolkendecke aufweisen; das entsprechende Bildmaterial muss als unbrauchbar aussortiert werden. Zeigt die Wolkendecke aber – größere – Lücken, besteht durchaus die Möglichkeit, zumindest einen Teil der bewölkten Geländebereiche doch einzusehen und auszuwerten. Ansatzpunkt dieser Auswertung ist der Tatbestand, dass einzelne Wolken in aufeinander folgenden Luftbildern eines mit der üblichen Längsüberdeckung aufgenommenen Bildstreifens infolge der zentralperspektivischen Aufnahme in den einzelnen Bildern jeweils in unterschiedlichen Bildpositio-



15a



15b



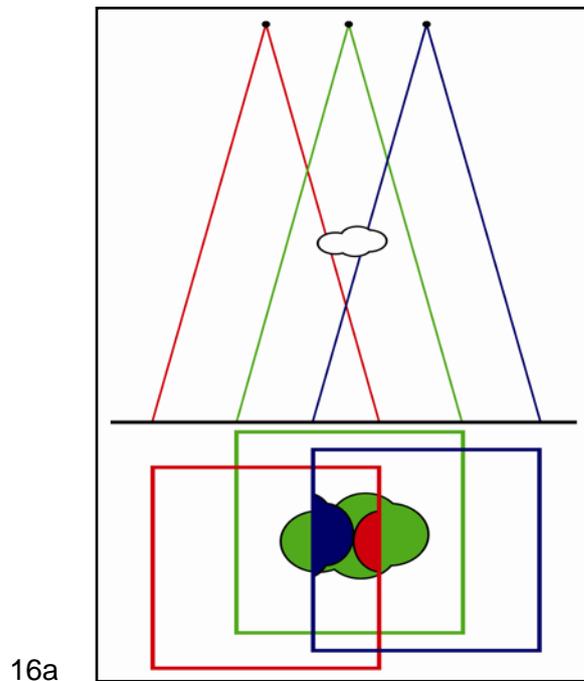
15c



15d

Abbildung 15: Beispiel einer photographischen Bildvorverarbeitung mit mehreren Verfahren. Das Bild 15a ist ein Ausschnitt aus dem Original-Luftbild. Bild 15b zeigt die Auswirkungen des Dodging, die in diesem Ausschnitt mit relativ geringen Grauwertunterschieden im Original, nicht allzu auffällig sind. Die Bilder 15c und d illustrieren die Qualitätsverbesserungen, wenn man das mit Dodging aufbereitete Bild anschließend mit einem Kantenverstärkungsfilter (hier: 9 x 9 Pixel; 15c) oder einer unscharfen Maske (15d) bearbeitet.

nen abgebildet werden (Abb. 16a). In jedem der Bilder werden also durch die Wolke(n) unterschiedliche Geländepartien verdeckt bzw. nicht verdeckt (s. Abb. 16b-d). Zwar ist nur selten eine durchgehend-flächendeckende „Geländeansicht“ und Bildanalyse möglich; zumindest können aber durch eine systematisch-vergleichende Auswertung der aufeinander folgenden Einzelbilder Teilerkenntnisse gewonnen und aus anderen Quellen abgeleitete Erkenntnisse überprüft werden (s. Redecker, 2008).



16a



16b



16c



16d

Abbildung 16: Möglichkeiten einer Objektkartierung bei partieller Wolkenabdeckung. Die Schemazeichnung (16a) verdeutlicht die Wiedergabe einer Wolke bzw. des von der Wolke abgedeckten Geländeausschnitts in drei Bildern einer mit Standard-Längsüberdeckung aufgenommenen Luftbildfolge. Die Bildausschnitte 16 b – d zeigen, dass in jedem der Bilder unterschiedliche Teilbereiche „einsehbar“ sind, also auch thematisch ausgewertet werden können. Bildvorlage: LANUV NRW – BOMPIC-Bestand.

Um einen effektiven und effizienten *Arbeitsablauf* zu gewährleisten, sollten die Maßnahmen der Bildverbesserung, die sich je nach photographisch-radiometrischer Qualität der verfügbaren bzw. ausgewählten Luftbilder als notwendig erweisen, verständlicherweise vor der *sachinhaltlichen Bildauswertung* durchgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Einsatz einer bestimmten Technik der photographischen Bildverbesserung die Ergebnisse des Einsatzes anderer Techniken „überlagern“, unter Umständen verfälschen oder zunichte machen kann. Es empfiehlt sich daher, bei der photographischen Vorverarbeitung systematisch fallorientiert, d.h. unter Beachtung der spezifischen Qualitätsmerkmale des auszuwertenden Bildmaterials, vorzugehen und die Auswirkungen angewandeter Manipulationen in einer dem Auswertungsmaßstab entsprechenden Vergrößerung unmittelbar auf ihre Verbesserungs- bzw. Verschlechterungswirkung hin zu überprüfen. Im Regelfall sollten die Bilder – sofern erforderlich – zunächst einem Dodging unterzogen und es sollten Histogrammoperationen durchgeführt werden, um augenfällige Helligkeitsunterschiede zu minimieren und die Bildkontraste insgesamt bzw. in erfassungsrelevanten Teilbereichen zu optimieren, damit die Objekt- und Detailerkennbarkeit verstärkt wird. Im Weiteren ist abzuwägen und zu überprüfen, ob und inwieweit Filteroperationen und hier insbesondere der Einsatz von Hochpassfiltern zur Kantenverstärkung die Auswertbarkeit der Bilder und die Identifizierung erfassungsrelevanter Bildinhalte verbessern können. Allerdings ist bei Filteroperationen wie auch bei Histogrammoperationen immer ein methodenkritisches Vorgehen geboten, damit es nicht zu irreführenden „Verfälschungen“ der Bilder kommt, indem etwa vorhandene erfassungsrelevante Bildobjekte und Objektdetails unterdrückt oder realiter nicht vorhandene Strukturen „kreiert“ werden.

4.3 Geometrische Bildvorverarbeitung

Wie im Vorangehenden (Kap. 3.1.1) bereits dargelegt, bestehen zwischen analog-photographisch und digital aufgenommenen Senkrechtluftbildern nicht nur photographisch-radiometrisch, sondern auch geometrisch keine grundlegenden Unterschiede. Beide haben bei einfacher visueller Betrachtung in der Wiedergabe des aufgenommenen Geländes ein hohes Maß an *Ähnlichkeit* mit mittel- und größermaßstäbigen *topographischen Karten*. Bei genauerer, vor allem quantitativ-messender und kartierender Auswertung ist allerdings gegenüber den Karten eine Reihe spezifischer geometrischer Unterschiede festzustellen. Diese sind im Wesentlichen dadurch bedingt, dass die Luftbilder – anders als die Karten – keine normalparallele, sondern eine zentralperspektivische Abbildung des Geländes darstellen. Im Folgenden sollen die grundlegenden, für die Auswertung zur Verdachtsflächenerfassung relevanten geometrischen Eigenschaften behandelt (4.3.1) und es soll aufgezeigt werden, wann, d.h. bei welchen Aufgabenstellungen, die geometrischen Mängel der Bilder in Form räumlicher Abbildungsungenauigkeiten beseitigt werden sollten und wie sie beseitigt werden können (4.3.2).

4.3.1 Geometrische Eigenschaften digitaler Luftbilder

Die elementaren geometrischen Eigenschaften von Senkrechtluftbildern sind wiederholt in den einschlägigen Leitfäden der nordrhein-westfälischen Umweltverwaltung beschrieben und

erläutert worden, so in MESA 9 (Kap. 2.3.4), MALBO 1 (Kap. 2.2.1), MALBO 22 (besonders Anhang III.4) und jüngst im LANUV-Arbeitsblatt Nr. 21 (Kap. 3.4.2.2). Daher soll im Folgenden nur kurz an die für die Verdachtsflächenerfassung wesentlichen Merkmale erinnert werden. Dabei ist im Hinblick auf die Auswertungspraxis zweckmäßigerweise zu unterscheiden nach standardgemäßen, d.h. „DIN-gerecht“ für Vermessungszwecke aufgenommenen Senkrecht-Reihenmessbildern und den während des Zweiten Weltkriegs entstandenen Luftbildern der alliierten Luftaufklärung (s. dazu MALBO 22 und LANUV NRW, 2013).

Der *Maßstab* von Senkrecht-Luftbildern resultiert aus dem Verhältnis der Kamera-Brennweite zur Flughöhe über dem aufgenommenen Gelände. Dieses kann in seiner Höhe über Normalnull auch innerhalb eines Bildes – unter Umständen beträchtlich – variieren. Anders als topographische Karten sind die Luftbilder daher nicht exakt, sondern nur *näherungsweise maßstabsgerecht*. Sie haben praktisch – entgegen den Angaben in den Findhilfen der Bildarchive – so gut wie nie „runde“, sondern im Regelfall „krumme“ Maßstäbe. Zudem sind die Maßstäbe „wild“, d.h., sie variieren innerhalb ein und desselben Bildes infolge der Höhenunterschiede im Gelände bzw. der Abweichung der Kamera-Achse von der Lotrechten.

Darüber hinaus bilden Senkrecht-Luftbilder – ebenfalls bedingt durch Höhendifferenzen im Gelände und/oder Neigungen der Kamera-Achse – den aufgenommenen Geländeausschnitt *de facto nicht lagegetreu* ab, sondern „verzerrt“, d.h., sie weisen gegenüber der Realität mehr oder weniger kräftige *Punktverlagerungen* auf. Wie sich die Abbildungsgeometrie der Luftbilder darstellen kann, verdeutlicht schematisch Abbildung 17.

Können jüngere, nach den Standards für Vermessungszwecke aufgenommene Senkrecht-Reihenmessbilder (s. DIN 18740-1) aufnahme- und abbildungsbedingt nicht maßstabsgerecht und lagegetreu sein, so gilt dies für *Kriegsluftbilder* in erheblich ausgeprägterem Maße – aus folgenden Gründen:

1. Der ganz überwiegende Teil der für das Gebiet von NRW verfügbaren Luftbilder, insgesamt gut 80 %, sind sogenannte „split verticals“. Hierbei handelt es sich um Bilder, die mit zwei rechtwinklig zur Flugrichtung angebrachten und synchron geschalteten Kameras aufgenommen wurden. Dabei waren beide Kameras jeweils zwischen 5° und 10° divergent nach Backbord und Steuerbord geneigt. Das heißt: Entgegen ihrer Bezeichnung sind die „split verticals“ *de facto* keine „verticals“, keine Senkrechtbilder (Abb. 18, links), sondern *Steilbilder*. Demgemäß nehmen ihre Maßstäbe von der Fluglinie nach außen jeweils ab, und das Ausmaß der Punktverlagerungen, also der „Verzerrungen“, nimmt in gleicher Richtung zu (s. Abb. 18, rechts).
2. Vielfach mussten die Aufklärer bei der Aufnahme eines Bildstreifens vom „optimalen“ geradlinigen Kurs abweichen und engere oder weitere Kurven fliegen (Abb. 19, links) bzw. auch die Flughöhe wechseln (Abb. 19, rechts), um beispielsweise der Flugabwehr auszuweichen. Dies verursachte kräftigere Bildneigungen und entsprechend stärkere Maßstabsschwankungen bzw. Punktverlagerungen innerhalb der einzelnen Bilder, aber auch von Bild zu Bild innerhalb eines Bildstreifens. Hinzu kommt, dass die Längsüberdeckung aufeinander folgender Bilder – unter Umständen kräftig – variiert und damit auch der „Zuschnitt“ und die Ausdehnung der als 3D-Modelle stereoskopisch auswertbaren Geländeausschnitte.

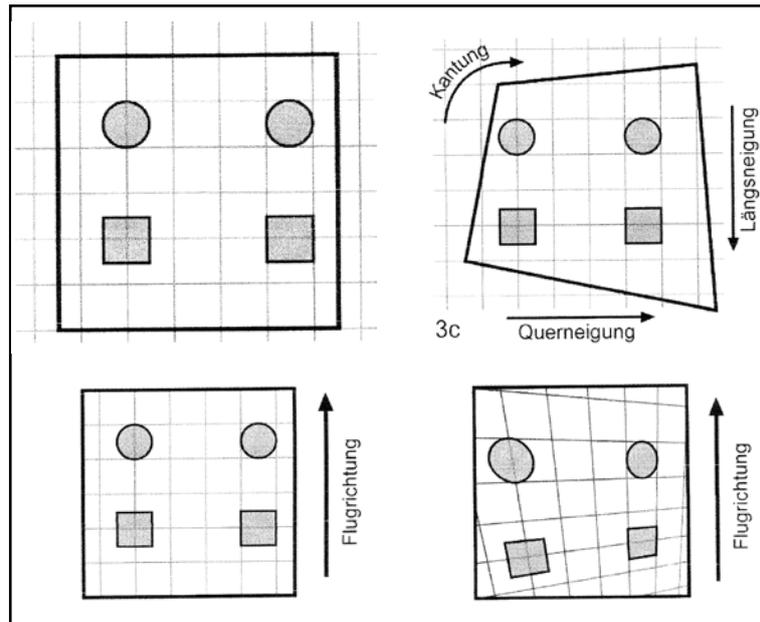


Abbildung 17: Zur Geometrie von Senkrecht-Luftbildern. Die Abbildung gibt (links oben) einen Geländeausschnitt mit einem Gitternetz und vier Objekten wieder. Sie zeigt links unten die nicht verzerrte, maßstäblich verkleinerte Abbildung dieses Geländeausschnitts – bspw. in einer topographischen Karte oder in einer Nadir-Luftbildaufnahme, wobei das Gelände keine Höhendifferenzen aufweist. Die Zeichnung rechts oben verdeutlicht die Aufnahme des Geländeausschnitts bei nicht-horizontaler Lage des Flugzeugs und damit auch der Kamera, d.h. mit einer Neigung der Rumpf- und der Flügelachse: Es wird ein trapezartiges Geländeviereck aufgenommen, und dieses wird im quadratischen Bildformat mit entsprechenden Punktverlagerungen/Verzerrungen und Maßstabsschwankungen im Luftbild wiedergegeben (rechts unten). Verändert nach LANUV NRW, 2009.

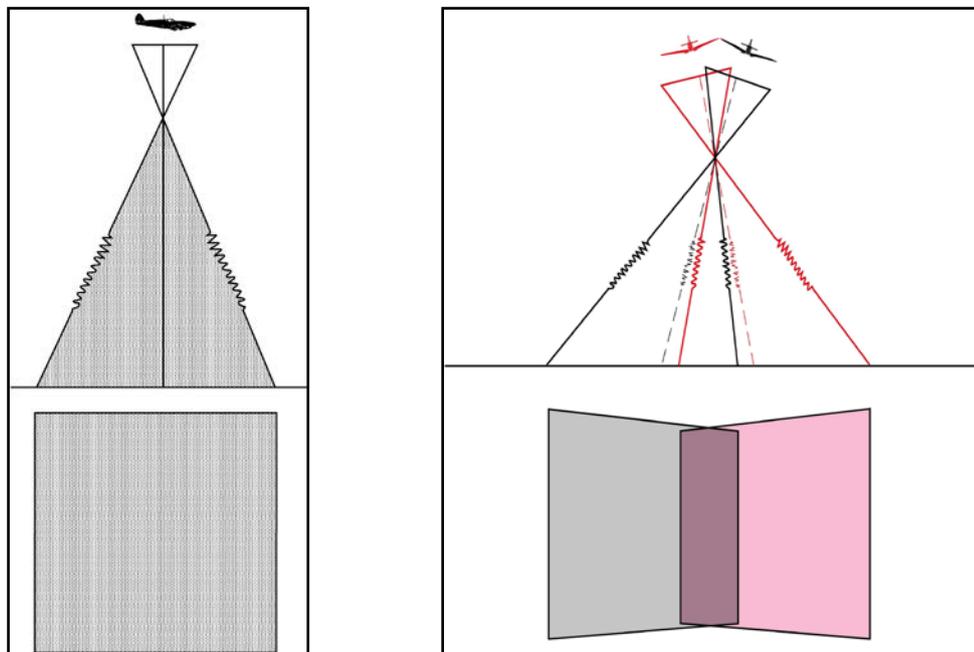


Abbildung 18: Schema einer Senkrecht- und einer divergenten Senkrechtaufnahme („split vertical“). Der Vergleich der „split verticals“ (r.) mit der „Standard-Senkrechaufnahme“ (I.) verdeutlicht, dass in diesen Kriegsluftbildern die neigungsbedingten Maßstabsveränderungen und Punktverlagerungen zwangsläufig stärker sein müssen. Nach MALBO 22.

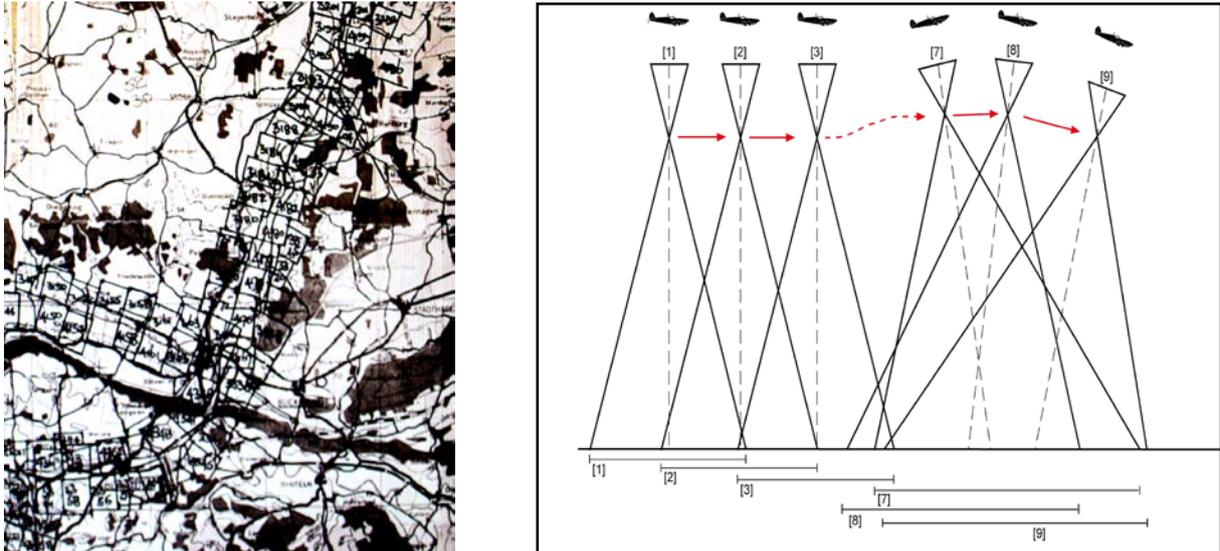


Abbildung 19: Zu den Aufnahmebedingungen bei Aufklärungsflügen. Ausschnitt aus einer Bildflugübersicht (l.) und schematische Darstellung der Aufnahme eines Bildstreifens (r.). Die Abbildungen zeigen den für viele Luftbilder aus den Kriegsjahren typischen Verlauf eines Flugstreifens mit Abweichungen vom normalerweise geradlinigen Verlauf sowie von der üblicherweise konstanten Flughöhe über Grund. Hieraus resultieren Bildneigungen (Quer- und Längsneigung), ferner Kantungen sowie Maßstabsschwankungen und eine variierende Längsüberdeckung aufeinander folgender Luftbilder. Abb. 19 links: Luftbildarchiv AG Geomatik; Abb. 19 rechts: ergänzt nach MALBO 22.

Über diese für analoge wie digitale Luftbilder typischen geometrischen Merkmale und – im Ergebnis – Abbildungsfehler hinaus kann bei den *digitalen Luftbildern* noch ein weiterer, nun aber „datenspezifischer“ geometrischer Abbildungsfehler hinzukommen: *Verzerrungen*, die aus dem *Scannen* der Original- oder Duplikatfilme bzw. der Kontaktkopien resultieren. Wurden für die Digitalisierung der analogen Luftbildvorlagen photogrammetrische Scanner oder hochwertige Desktopscanner benutzt, so wird es – wie in Kapitel 2.2 ausgeführt – *keine scanbedingten geometrischen Abbildungsfehler* geben, die bei einer Verdachtsflächenkartierung berücksichtigt werden müssten. Sind die Bildvorlagen mit einfachen Bürosclannern digitalisiert worden, ist mit Abbildungsfehlern zu rechnen, die gemeinhin eine Korrektur erfordern bzw. zu entsprechenden geometrischen und möglicherweise auch inhaltlichen Kartierungsgenauigkeiten führen.

4.3.2 Geometrische Bildvorverarbeitung

Wie vorangehend in Kapitel 4.3.1 dargelegt, weisen alle digitalen Luftbilder – unabhängig davon, ob es sich um digital aufgenommene oder durch das Scannen von analogen Luftbildern entstandene Datensätze handelt – aufnahme-, objekt- bzw. scanbedingte geometrische Abbildungsfehler auf. Diese Fehler können letztlich *vernachlässigt* werden, wenn die Bildanalyse im Erfassungsprozess nur dazu dient, die anhand anderer Quellen, z.B. Akten, Betriebspläne u.ä., gewonnenen Erkenntnisse zu *überprüfen*, d.h. wenn die Auswertung, wie in Kapitel 2.1 ausgeführt, strikt *qualitativ-beschreibend* bleibt. Sobald bei der Bildauswertung allerdings Objektgrößen und/oder Distanzen ermittelt werden sollen, also *Strecken-* und/oder

Flächenmessungen durchzuführen sind, müssen die geometrischen Abbildungsfehler der Luftbilder allerdings beachtet werden. Wie hierbei vorzugehen ist, d.h. wie in nicht entzerrten und nicht georeferenzierten *Originalluftbildern* Strecken gemessen und Flächendimensionen zumindest näherungsweise ermittelt werden können, ist in Abbildung 20 zusammengefasst.

Voraussetzungen:

- Die zur Bildbetrachtung eingesetzte Software muss ein Werkzeug für Streckenmessungen umfassen.
- Die Pixel-Kantenlänge (s_0) muss bekannt bzw. zu ermitteln sein.
- Die auszumessenden Geländestrecken/Objekte müssen in (größervermaßstäbigen) topographischen Karten möglichst genau abmessbar bzw. in ihrer realen Länge bekannt sein.

Streckenauswahl:

- Die Messungen sollten jeweils in dem Luftbild durchgeführt werden, in dem die auszumessenden Objekte/Strecken im engeren *Umkreis der Bildmitte* abgebildet sind, denn hier fallen die relief- und neigungsbedingten Verzerrungen am geringsten aus. Streckenmessungen in den Bildrandbereichen sind zu vermeiden.
- Die auszumessenden Strecken sollten jeweils eine möglichst einheitliche Geländehöhe aufweisen und im Höhengniveau der zu untersuchenden Verdachtsfläche liegen. Weist die Verdachtsfläche größere Höhenunterschiede auf, sind Strecken in den unterschiedlichen Höhengniveaus auszumessen.
- Die Mess-Strecken sollten möglichst lang sein, um die Auswirkungen unvermeidlicher Messungenauigkeiten zu minimieren.

Maßstabsberechnung:

Es gilt:

$$m_B = S_K \times m_K / S_B$$

Dabei ist

m = Maßstabsfaktor; m_B = Maßstabsfaktor des Luftbilds; m_K = Maßstabsfaktor der Karte

S = Mess-Strecke; S_B = Strecke im Luftbild; S_K = Strecke in der Karte

Abbildung 20: Hinweise zu Objektmessungen in nicht georeferenzierten digitalen Luftbildern

Nicht ganz unproblematisch ist die Luftbildauswertung auch bei der *Analyse der dritten Dimension*, also bei der Erfassung von Gelände- bzw. Objekt-Höhen. In *Einzelbildern* können hier aus der Länge der Schlagschatten von Geländeobjekten Näherungswerte zur Größenordnung der Höhenunterschiede abgeleitet werden. Dabei sind allerdings verschiedene Bestimmungsfaktoren zu berücksichtigen (s. u.a. Albertz, 2009), die bei einem Teil des historischen Bildmaterials meistens nicht bekannt und oft auch nicht (mehr) zu ermitteln sind (z.B. genaue Tageszeit der Aufnahme).

Wird ein digitales Bildpaar stereoskopisch ausgewertet, nimmt der Betrachter die Höhendifferenzen im dreidimensional-plastischen Modell des aufgenommenen Geländes am Bildschirm zwar unmittelbar wahr. Wie bei der analogen Bildauswertung erscheint aber auch im digitalen Bildmodell am Bildschirm der Vertikalmaßstab (z-Dimension) größer als der Horizontalmaßstab (x-/y-Grundrissdimension). Mithin stellt sich das wahrgenommene Modell *überhöht* dar, und zwar in der Regel um das Zwei- bis Vierfache (s. LANUV NRW, 2013, Kap. 3.4.2.2).

Zwar ist es durchaus möglich, Höhendifferenzen *abzuschätzen*. Bei einer schätzungsbasier-ten Klassifizierung von Altablagerungen nach Mächtigkeitkategorien, wie sie gelegentlich vorgeschlagen worden ist (z.B. Kerth et al., 2001), erscheint allerdings Vorsicht und Zurückhaltung geboten: Sollen hier nicht nur grobe, primär qualitativ-beschreibende Näherungswerte ermittelt werden, sind – gerade wegen der Überhöhung – genauere Messungen im drei-dimensionalen Bildmodell erforderlich. Diese Messungen sollten – im Hinblick auf die weiteren Schritte der Bearbeitung einer Verdachtsfläche – geometrisch-räumlich möglichst exakt lokalisiert, d.h. in der Auswertungspraxis: in einem georeferenzierten Luftbildmodell, durchgeführt werden.

Um Luftbilder zu *georeferenzieren*, sind die relief- und aufnahmebedingten geometrischen Abbildungsfehler zu beseitigen (*Rektifizierung*) und die Bilder in ein Koordinatensystem der Landesvermessung einzupassen (*Geokodierung*). Hierfür kommen verschiedene Verfahrensansätze in Frage (s. u.a. Albertz 2009).

Grundvoraussetzung für den praktischen Einsatz aller Rektifizierungs- und Geokodierungsverfahren ist ein räumlich-geometrisches *Bezugssystem* von *Bodenpasspunkten*, auf das die Luftbilder referenziert werden können. Passpunkte müssen

1. in den zu referenzierenden Luftbildern – und bei multitemporaler Bildauswertung in möglichst allen bzw. möglichst vielen Aufnahmezeitschnitten – eindeutig erkennbar und
2. in ihren Lagekoordinaten sowie ihren Normalhöhenwerten, also mit ihren x-, y- und z-Koordinaten, im Landeskoordinatensystem bekannt bzw. hinreichend genau zu ermitteln sein.

Um im Einzelfall geeignete Bodenpasspunkte auszuwählen, empfiehlt sich in der Auswertungspraxis normalerweise der Rückgriff auf die Deutsche Grundkarte 1:5.000 (DGK5) / Digitale Grundkarte 1:5.000. Hierbei ist zu beachten, dass sich deren Lagegenauigkeit (x-/y-Koordinaten) im Toleranzbereich von ± 3 m bewegt und Höhenwerte (z-Koordinaten) mit der DGK5 nur aus den interpolierten sowie zudem mehr oder weniger kräftig generalisierten (geglätteten) Höhenlinien abgeleitet werden können. Daher ist für die Höhenbestimmung (z-Koordinate) der Passpunkte ein dem Kartiermaßstab angemessen genaues Höhenmodell hinzuzuziehen. Hierbei bietet sich die Verwendung der Digitalen Oberflächenmodelle (DOM) oder der Digitalen Geländemodelle (DGM) von GEObasis NRW in der jeweils entsprechenden Auflösung an. Hierbei ist zu beachten, dass die Werte in den Höhenmodellen je nach Produkt mit Geländeobjekten abgebildet sind (DOM) oder die um Vegetation und Baukörper bereinigte Geländeoberfläche wiedergeben (DGM)¹⁶. Alternativ zur DGK5 bietet es sich an, die Bodenpasspunkte anhand der entsprechenden Digitalen Orthophotos DOP 10 oder DOP 20 von GEObasis NRW zu ermitteln; sie gewährleisten eine mittlere Lagegenauigkeit von ± 30 cm bzw. ± 60 cm.¹⁷

¹⁶ http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/produkte/reliefinformationen/index.html

¹⁷ Siehe http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/, Untermenü Produkte > Bildinformation > Digitale Orthophotos (DOP). Sind für die Referenzierung lediglich x- und y-Koordinaten erforderlich, kommt auch die Digitale Liegenschaftskarte (ALK) als Quelle für die Passpunkt-Ermittlung in Frage; siehe dazu http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/, Untermenüs Produkte und Dienste > Liegenschaftsinformation > Katasterinformation > ALK. - Als

Sind Bilder älterer Zeitschnitte zu referenzieren, für die keine zeitnahe DGK5-Ausgabe vorliegt, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, zur Bestimmung geeigneter Bodenpasspunkte eine dem Aufnahmezeitpunkt möglichst nahe Ausgabe der Topographischen Karte 1:25.000 (TK25) / DTK25¹⁸ heranzuziehen. Hierbei muss allerdings maßstabs- und generalisierungsbedingt mit Lageungenauigkeit in einer Größenordnung von bis zu ± 20 m gerechnet werden. Erscheint dies – trotz (oder wegen) der eingeschränkten Qualität der historischen Bilder – nicht hinnehmbar, sollte ein jüngerer Bilddatensatz auf der Grundlage genauerer Bodenpasspunkte (z.B. aus der DGK5), georeferenziert und dieser Bilddatensatz dann rückschreibend als geometrisches Referenzsystem zur Bearbeitung der (noch) älteren Bilder benutzt werden.

Um in der Erfassungspraxis Luftbilder zu rektifizieren bzw. zu georeferenzieren, d.h. das gesamte Bild oder gegebenenfalls auch nur Bildausschnitte so umzurechnen, dass der aufgenommene Geländeausschnitt in einem geodätischen Referenzsystem lage- und grundrissgenau wiedergegeben wird, bieten sich verschiedene Vorgehensweisen an: verschiedene nicht-parametrische Verfahren und zweitens der parametrische Ansatz, wobei sich „parametrisch“ hier auf bildspezifische geometrisch-technische Kenndaten der Luftbilddaufnahme einschließlich Aufnahmesystem bezieht.

Zu 1: Nicht-parametrische Verfahren

Bei der Georeferenzierung durch nicht-parametrische Verfahren spielen, wie die Bezeichnung signalisiert, Parameter der spezifischen Aufnahmesituation/-konfiguration keine Rolle. Die Referenzierung erfolgt allein auf der Grundlage von homologen Bild- und Geländepasspunktpaaren, indem über Interpolationsansätze eine geometrische Beziehung zwischen den x- und y-Koordinaten des jeweiligen Bild- und des dazugehörigen Geländepasspunktes hergestellt wird. Der Transformationsprozess zur korrekten Einpassung der digitalen Luftbilddatensätze in das räumliche Referenzsystem kann Verschiebungen (Translation) in x-/y-Richtung, Drehungen (Rotation) und Maßstabsanpassungen (Skalierung) umfassen.

Gängige nicht-parametrische Verfahrensansätze, die in einschlägiger Software zur digitalen Luftbilddauswertung implementiert sind, sind unter anderem:

- Affintransformation
- Polynomtransformation
- Projektive Transformation

Generell sind die nicht-parametrischen Ansätze zur Luftbild-Georeferenzierung als Einfachverfahren anzusehen (s. auch AH KMR, 2007). Sie haben den Vorteil, dass sie auch zur

Bodenpasspunkte höchster Genauigkeit stehen grundsätzlich die Festpunkte der nordrhein-westfälischen Landesvermessung zur Verfügung. Diese sind vielfach allerdings in (historischen) Luftbildern entweder nicht vorhanden oder in den Bildern nicht eindeutig zu identifizieren; in der Praxis der Verdachtsflächenerfassung kommen sie daher für die geometrische Bildaufbereitung normalerweise kaum in Frage. – Zur Information über die Festpunkte s. http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/produkte/, Untermenüs Raumbezug > Festpunktdaten.

¹⁸ Siehe http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/, Untermenüs Produkte und Dienste > Digitale Topographische Karten > Digitale Topographische Karte 1:25.000 (DTK25).

Entzerrung/Transformation von Bildausschnitten eingesetzt werden können; sie sind mit vergleichsweise geringem Aufwand umzusetzen und liefern oft für die Verdachtsflächenerfassung durchaus hinreichend genaue Ergebnisse. Dies gilt namentlich dann, wenn die Bilder überwiegend deskriptiv ausgewertet und nur elementare Objektmessungen durchgeführt oder Einzelobjekte (näherungsweise genau) in ihrer Lage erfasst werden sollen. Allerdings ist zu beachten, dass sie nur für die Entzerrung von Luftbildern bei ebenem Gelände bzw. geringen Höhenunterschieden im Untersuchungsgebiet herangezogen werden, da die aus Höhenunterschieden resultierenden Lagefehler von Bildpunkten (radialer Punktversatz; s. Kap. 4.3.1) generell nicht beseitigt werden und ab einer bestimmten Größenordnung nicht (mehr) tolerierbare geometrische Erfassungsfehler verursachen. Um zu entscheiden, ob bzw. inwieweit höhenbedingte Lagefehler vernachlässigt werden können, empfiehlt sich ein Abwägen mit Hilfe der folgenden *Faustformel* (s. auch LANUV NRW, 2013, Abb. 14):

$$\text{„kritische“ Höhendifferenz im Gelände (in m)} = m_B \text{ (bzw. } m_K) / 500 \text{ (Normalwinkel-Kamera) bzw.}$$

$$\text{„kritische“ Höhendifferenz im Gelände (in m)} = m_B \text{ (bzw. } m_K) / 1000 \text{ (Weitwinkel-Kamera)}$$

$$[m_B = \text{Maßstabszahl des Luftbildes, } m_K = \text{Maßstabszahl der Auswertung/Kartierung}]$$

So können beispielsweise höhenbedingte Lagefehler vernachlässigt werden, wenn bei einer Aufnahme mit einer Normalwinkel-Kamera im Bildmaßstab 1:15.000 die Höhendifferenzen im Gelände kleiner als der „kritische“ Wert von 30 m sind. Soll mit dem Bildmaterial allerdings im Maßstab 1:5.000 kartiert werden (m_K), ist bei Gelände-Höhenunterschieden von >10 m mit merklichen Lagefehlern zu rechnen. Hier ist dann in der Erfassungspraxis abzuwägen, ob und inwieweit diese Fehler in ihrer Größenordnung für das Auswertungsergebnis tatsächlich (schon) relevant sind oder ob sie ignoriert werden können. Ist Letzteres nicht möglich, muss, soweit das überlieferte Luftbildmaterial einschließlich der aufnahmerelevanten Metadaten dies zulassen, zur Kompensation der Abbildungsfehler mit dem aufwendigeren parametrischen Verfahrensansatz der Georeferenzierung gearbeitet werden.

Zu 2: Parametrisches Verfahren

Bei diesem Ansatz zur Georeferenzierung von Luftbildern, der Aerotriangulation (mit Blockbündelausgleich), wird die Aufnahmekonfiguration der einzelnen Bilder in der Abfolge eines Bildstreifens bzw. eines Bildblockes rekonstruiert (s. u.a. ALF, 2012; AH KMR, 2007).

Erster Schritt dieses Verfahrens ist die *innere Orientierung*. Ihr Ziel ist es, über die bei der Aufnahme durch die Rahmenmarken auf dem Luftbild abgebildeten Bildmarken eine Beziehung zwischen dem durch die Rahmenmarken und Kalibrierung bestimmten Kamerakoordinatensystem mit dem Bildkoordinatensystem herzustellen. Die dazu in die Software einzutragenden notwendigen kalibrierten Bild- bzw. Aufnahmeparameter sind:

- die Brennweite (genauer: Kammerkonstante),
- die Koordinaten der Rahmenmarken,
- die Linsenverzerrung und
- die Mittelpunktkoordinaten

ferner sind die Pixelkoordinaten der Bildmarken einzumessen.

Die genannten Kameraparameter sind normalerweise den *Kalibrierprotokollen* zu entnehmen. Diese sollten entweder beim Auftraggeber der Befliegung oder bei der Befliegungsfirma vorliegen und bei der Bestellung der für ein Erfassungsprojekt notwendigen Luftbilder ausdrücklich mit angefordert werden, wenn eine parametrische Auswertung vorgesehen ist. Bei älterem historischem Bildmaterial sind vielfach keine Kalibrierprotokolle verfügbar. Fehlen die erforderlichen Parameter für die innere Orientierung, dann müssen diese nach Möglichkeit in Kenntnis der verwendeten Aufnahmesysteme teilweise gemessen, geschätzt oder rekonstruiert werden. Bei fehlenden Bildmarken müssen diese durch synthetische ersetzt werden, um diese für die innere Orientierung einmessen zu können.

Der zweite Arbeitsschritt der parametrischen Luftbild-Georeferenzierung umfasst das Herstellen der *äußeren Orientierung*. Hierbei wird in einem ersten Arbeitsschritt, der *relativen Orientierung*, rekonstruiert, wie die einzelnen Luftbilder im Verlauf des Bildflugs jeweils räumlich zueinander angeordnet waren. Dazu werden in den Überlappungsbereichen der Luftbilder die Bildkoordinaten homologer Bildpunkte (sogenannte Verknüpfungspunkte) einander zugeordnet, so dass die Bilder zu einem Bildverband verknüpft werden können. In einem zweiten Arbeitsschritt erfolgt dann die *absolute Orientierung* anhand der inneren und relativen Orientierung sowie von Geländepasspunkten. Hierbei wird im Rahmen des (selbstkalibrierenden) Bündelblockausgleichs in einem iterativen Verfahren die räumliche Lage des Kamerasystems zum Zeitpunkt der Aufnahme näherungsweise rekonstruiert. Dabei werden die Parameter der äußeren Orientierung ermittelt:

- die x-, y-, z-Koordinaten des Projektionszentrums in Geländekoordinaten
- die Ausrichtungswinkel der Bildebene Omega (ω), Phi (φ) und Kappa (κ) (Roll-, Nick-, Kantungswinkel)

Anhand der Parameter der äußeren Orientierung kann das in den Überlappungsbereichen der Bilder abgebildete Gelände dreidimensional visualisiert und ausgewertet werden: Dazu kann die räumliche Lage beliebiger Geländepunkte bzw. -objekte in ihren x-, y- und z-Koordinaten bestimmt und maßstabs- sowie lagegenau kartiert werden. Durch automatisierte Punktzuordnungsverfahren lassen sich Oberflächenmodelle berechnen, anhand derer die Bilder orthoentzerrt oder Volumina bestimmt werden können.

Nach dem Abschluss jeder parametrischen und erst recht jeder nicht-parametrischen Luftbild-Georeferenzierung empfiehlt sich eine Analyse und *Überprüfung* der erzielten *geometrisch-räumlichen Genauigkeit*. Hierbei sind die Art und damit einhergehend die geometrischen Eigenschaften des bearbeiteten Bildmaterials, insbesondere dessen räumliche Auflösung, ferner die Zuverlässigkeit der benutzten Passpunkte bzw. Passpunkt-Quellen sowie schließlich der Referenzierungsprozess selbst in Betracht zu ziehen. Einen direkten und schnellen Überblick über das Ausmaß verbliebener Lagefehler sowie deren Art (zufällig oder systematisch) vermittelt das Überlagern von Grundrissinformationen (DGK5 bzw. der Digitalen Liegenschaftskarte [ALK]) oder das alternierende Überblenden eines aktuellen digitalen Orthophotos (DOP 10 oder DOP 20) über die georeferenzierten historischen Luftbilder.

5 Thematische Auswertung von digitalen Luftbildern

Ziel jeder thematischen Auswertung digitaler – wie auch analoger – Luftbilder ist die *Identifizierung* bzw. *Kartierung* der durch die Aufgabenstellung vorgegebenen Bildinhalte, kurz auch: die *Bildinterpretation* (vgl. u.a. Albertz, 2009). Demgemäß geht es bei der einzelfallbezogenen Erfassung altlastverdächtiger Flächen um die Lokalisierung und Identifizierung von kontaminationsverdächtigen Altanlagen und Altablagerungen sowie von potentiell umweltbelastenden Ereignissen wie etwa Betriebsstörungen/-unfälle oder Kriegseinwirkungen und den davon betroffenen Liegenschaftsbereichen. Hierzu wird im Folgenden zunächst die grundlegende – primär technische – Frage der Erkennbarkeit und Identifizierbarkeit von Bildobjekten sowie deren maßstabsgerechter Kartierbarkeit behandelt (5.1); sodann werden exemplarisch die Möglichkeiten und Grenzen der sachlich-semanticen Objekterfassung verdeutlicht (5.2).

5.1 Erkennbarkeit, Identifizierbarkeit und Kartierung erfassungsrelevanter Objekte in digitalen Luftbildern

Damit Geländeobjekte, so auch erfassungsrelevante, am Bildschirm *visuell* als eigenständige Bildinhalte erkannt, d.h. als diskrete Objekte *wahrgenommen* werden können, müssen sie eine bestimmte (minimale) Größe aufweisen. Bei einem Großteil der Bildinhalte genügt diese Minimaldimensionierung allerdings nicht, um die Objekte auch zu *identifizieren*, d.h. sie sachlich-semantic zutreffend zu klassifizieren und funktional möglichst genau zu benennen. Hierzu sind, wie die Praxis sowohl der analogen als auch der digitalen Luftbilddauswertung zeigt, andere – größere – Objektdimensionen erforderlich. Zudem ist eine Kartierung bzw. kartographische Dokumentation der erkannten und identifizierten altlastverdächtigen Objekte/Bereiche, die den Standards der Verdachtsflächenerfassung genügt, nicht mit Luftbildern jeglichen Maßstabs möglich, sondern sie erfordert Bilder mit hinreichend großen Aufnahmemastäben. Daher soll nachfolgend in gebotener Kürze die generelle Frage (1.) der Objekterkennbarkeit, (2.) der Identifizierbarkeit und (3.) der maßstabsadäquaten Kartierung altlastrelevanter Objekte in digitalen Luftbildern abgehandelt werden.

Zu 1: Objekterkennbarkeit

Zur Frage nach der *Mindestgröße erkennbarer Bildinhalte* bietet die Theorie der Luftbilddauswertung zwar einige Ansätze (vgl. z.B. Schenk, 1999; Albertz, 2009). In der Auswertungspraxis ist ein Teil dieser Ansätze allerdings nicht anwendbar, weil namentlich für das ältere historische Bildmaterial die notwendigen Metadaten nicht bekannt und auch nicht rekonstruierbar sind. Dennoch bestehen (praxiserprobte) Möglichkeiten, um in der Vorbereitungsphase der Bildauswertung die *visuelle Erkennbarkeit von Objektdetails bzw. Objekten in Luftbildern* zumindest näherungsweise einschätzen zu können. Ansatzpunkt ist die Bodenauflösung (GSD). Verständlicherweise können Objektdetails bzw. Objekte, die kleiner als die Bodenauflösung sind, nicht als diskrete Elemente abgebildet werden; dementsprechend sind sie im Luftbild auch nicht erkennbar. Erkennbar sind Objekte/Objektdetails im Regelfall nur

dann, wenn sie größer dimensioniert sind als die Bodenauflösung. Nun ist die Frage, wie viel sie größer sein müssen, um erkennbar zu sein, in der Praxis zwar nicht eindeutig und verbindlich zu beantworten (vgl. auch Richter/Teichert, 2009). Einen Näherungswert liefert jedoch eine im Rahmen der Satellitenbilddauswertung entwickelte Faustformel (vgl. o.V., 1979): Hiernach sind Geländeobjekte dann visuell erkennbar, wenn sie in ihrer Minimaldimension die *doppelte Länge der Pixel-Diagonalen* aufweisen (s. Abb. 21). So sind, wie die Beispielrechnung verdeutlicht, bei einer Bodenauflösung von 20 cm normalerweise Objekte bzw. Objektdetails in einer Größenordnung von rund 55 bis 60 cm zu erkennen.

Faustformel
zur Ermittlung der Objekterkennbarkeit in Luftbildern

$$\text{Min}_D \approx 2 \times \sqrt{S_a^2 + S_b^2}$$

Min_D = Mindestgröße des Objekts/Objektdetails
S_a = Seitenlänge a des Bodenelements (GSD)
S_b = Seitenlänge b des Bodenelements (GSD)

Beispiel:

S_a = S_b = 20 cm

$$\text{Min}_D \approx 2 \times \sqrt{20^2 + 20^2} = \sqrt{400 + 400} =$$

Abbildung 21: Zur Detailerkennbarkeit in digitalen Luftbildern

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt ein – im Wesentlichen auf Empirie basierender – Ansatz (vgl. ALF, 2012; Schiewe/Ehlers, 2004), demzufolge davon auszugehen ist, dass Objekte/Objektdetails visuell erkennbar sind, wenn sie wenigstens die *dreifache Größe der Bodenauflösung* haben, also:

$$\text{Min}_D \approx 3 \times \text{GSD}$$

(d.h. mit den Zahlenwerten im Beispiel der Abbildung 21: Min_D ≈ 3 x 20 cm ≈ 60 cm).

Zu 2: Objektidentifizierbarkeit

Sind Geländeobjekte hinreichend groß, um im Luftbild visuell als diskrete Objekte oder Objektdetails wahrgenommen zu werden, bedeutet dies gemeinhin nicht, dass sie damit auch identifiziert, also sachlich zutreffend benannt werden können. Mit anderen Worten: Die Mindestgröße der *Erkennbarkeit* von Bildinhalten als diskrete Geländeobjekte darf (und sollte) im Regelfall nicht mit der *Mindestgröße der Identifizierbarkeit* dieser Objekte gleichgesetzt werden. Vielmehr gilt: Damit im Bild als Objekte bzw. Objektdetails erkannte Inhalte auch *identifiziert*, also zutreffend klassifiziert und benannt, werden können, sollten sie eine Mindestgröße haben, welche die Mindestgröße des Erkennens der Bildinhalte als eigenständige Objekte/-details überschreitet. Die Frage, um wie viel die Mindestgröße der Erkennbarkeit über-

schritten werden muss, damit die Bildobjekte zuverlässig identifiziert werden können, wird in der Fachliteratur recht unterschiedlich beantwortet. Nach Schiewe/Ehlers (2004) sollten sie um den Faktor 8, nach ALF (2012) um den Faktor 21 größer sein als die zur *Objekterkennung* notwendigen Mindestdimensionen. Das heißt: In Luftbilddateien mit einer Bodenauflösung (GSD) von 20 cm können Geländeobjekte ab einer Mindestgröße zwischen 55 und 60 cm zwar als diskrete Bildelemente visuell *erkannt* werden (s. vorangehend [1]); zu *identifizieren* sind sie normalerweise aber nur, wenn sie realiter eine Ausdehnung haben von GSD 20 x 8 ≈ 160 cm oder gar GSD 20 x 21 = 420 cm.

Welcher dieser Richtwerte den Gegebenheiten in der Auswertungspraxis am ehesten entspricht, hängt u.a. vom *Kontrast*¹⁹ zwischen den erfassungsrelevanten Objekten bzw. Objektmerkmalen und deren unmittelbarer Umgebung ab. Hier gilt: Je höher die Kontraste, desto besser sind die Objekte/Objektdetails erkennbar und – auch bei geringerer Objektgröße – identifizierbar. Zudem kann die *Objektform* ein wichtiger Faktor sein. So ist es durchaus möglich, dass bei deutlichen Grauwertunterschieden insbesondere lineare Objekte und Strukturen wie etwa Rohrleitungssysteme erkannt und identifiziert werden können, auch wenn sie in ihrer kleinsten Dimension nicht die Größe der Bodenauflösung aufweisen. Über diese aufnahmetechnischen Faktoren hinaus kann die semantisch angestrebte *Identifizierungsstufe* (s. Kap. 5.2) eine Rolle spielen: Sollen beispielsweise Fabrikgebäude nicht nur als solche erfasst, sondern weiter nach Nutzungen/Funktionen differenziert werden, ist dies – sofern denn überhaupt – nur möglich, wenn Objektdetails wie etwa Dachaufbauten hinreichend groß sind, damit sie nicht nur – grob – als Aufbauten erkannt, sondern aufgrund ihres spezifischen Erscheinungsbildes auch – differenzierter – in ihrer Funktion/Nutzung identifiziert werden können.

Zu 3: Maßstabsadäquate Objektkartierung

Sollen die Luftbildmodelle nicht nur qualitativ-beschreibend ausgewertet, sondern die erfassungsrelevanten Bildinformationen *lagegenau kartiert* werden, ist die Frage abzuklären, ob und inwieweit die *Maßstäbe* des verfügbaren bzw. ausgewerteten Bildmaterials hinreichend groß sind, um die einschlägigen Anlagen und Ablagerungen in der topographischen Genauigkeit zu kartieren, die im jeweiligen Erfassungsfall vorgesehen oder notwendig ist. Zur Beantwortung dieser Frage ist eine in der analogen Bildmessung empirisch entwickelte *Faustformel* zum Beziehungszusammenhang zwischen *Bildmaßstab* und *Karten-/Kartiermaßstab* heranzuziehen. Danach errechnet sich der Luftbildmaßstab (Maßstabszahl m_B), der den Genauigkeitsanforderungen einer Kartierung in einem festgelegten Maßstab (Maßstabszahl m_K) zu entsprechen vermag, wie in Abbildung 22 angegeben: Die Quadratwurzel aus der Maßstabszahl der vorgesehenen Kartierung multipliziert mit einer Konstanten zwischen 200 und 300²⁰ ergibt den Maßstab (Maßstabszahl m_B), den die Luftbilder haben sollten, um eine maßstäblich hinreichend genaue Kartierung zu gewährleisten.

¹⁹ Das Ausmaß des Kontrastes ist durch den Quotienten aus hellstem/höchstem und dunkelstem/niedrigstem Grauwert zu charakterisieren (s. Gierloff-Emden, 1989). Der Maßwert bezieht sich normalerweise auf das gesamte Bild; in der Auswertungspraxis kann er aber auch auf Bildausschnitte angewendet werden.

²⁰ Die Größenordnung der Konstanten hängt vor allem vom Leistungsvermögen der bei den Aufnahmen eingesetzten Objektive ab. In den 1930er Jahren wurde sie mit 100 angesetzt, seit den 1950er

Faustformel
zur Ermittlung des für Kartierungen erforderlichen Luftbildmaßstabs

$$m_B = 250 \times \sqrt{m_K} \text{ oder } m_B = 200 \times \sqrt{m_K}$$

m_B = Maßstabsfaktor Luftbild, m_K = Maßstabsfaktor Kartierung/Karte
 250 / 200 = Konstante nach Albertz (2009) bzw. Pfeifer/Weimann (1991)

Abbildung 22: Zum Verhältnis von Luftbild- zu Karten-/Kartiermaßstab

Die in Tabelle 10 zusammengestellten Ergebnisse von Beispielberechnungen zeigen, dass – verständlicherweise – bei dem durch niedrigere Konstanten (der Bildgüte) charakterisierten (also älterem) Bildmaterial größere Bildmaßstäbe erforderlich sind als bei Bildern aus jüngeren Aufnahmen, damit hinreichend genau kartiert werden kann. Konkret: Damit in dem in der Erfassungspraxis vielfach üblichen Maßstab 1:1.000 in maßstabskonformer geometrischer Genauigkeit kartiert werden kann, sollten Luftbilder in Aufnahmemaßstäben > 1:8.000 herangezogen werden, und um altlastrelevante Bildinhalte in Maßstäben bis 1:2.500 maßstabskonform lagegenau kartieren zu können, müsste generell Bildmaterial in Maßstäben zwischen etwa 1:5.000 und rund 1:12.500/13.000 ausgewertet werden. Mit kleinermaßstäbigen Luftbildern sollte (kann) bei konsequenter Beachtung der maßstabspezifischen Genauigkeitsstandards letztlich nur gearbeitet werden, wenn im Maßstab 1:5.000 und kleiner kartiert wird.

Tabelle 10: Beispielberechnungen zur Beziehung Maßstabsfaktor Luftbild und Kartierung

Maßstabsfaktor Kartierung (m_K)	Konstante	Maßstabsfaktor Luftbild (m_B)
1.000	100	3.200
	200	6.300
	250	7.900
2.500	100	5.000
	200	10.000
	250	12.500
5.000	100	7.100
	200	14.200
	250	17.800
10.000	100	10.000
	200	20.000
	250	25.000

Jahren mit 200 und seit den 1970er Jahren mit 250 oder 300 (s. dazu Schwidefsky/Ackermann, 1976; Pfeiffer/Weimann, 1991; Albertz, 2009). Bei historischem Bildmaterial sollte mit der für den jeweiligen Zeitraum angegebenen Konstanten gearbeitet werden, also bei Kriegsluftbildern: 100 – 150, Bildern der 1950er Jahre: 200, Bildern der späten 1960er und ab den 1970er Jahren: 250/300.

Natürlich ist es in der Praxis der multitemporalen Luftbilddauswertung immer möglich, mit – nach „Standard“ – kleinermaßstäbigem Bildmaterial auch in größeren Maßstäben zu kartieren. Die geometrische Genauigkeit der betreffenden Karten entspricht dann aber in der Regel nur dem Luftbild-, nicht aber dem Kartiermaßstab, also dem Maßstab der kartographischen Ergebnisdarstellung.

In der Praxis der Verdachtsflächenkartierung sollte der Beziehungszusammenhang zwischen Luftbild- und Kartier- bzw. Kartenmaßstab in seinen Konsequenzen für die geometrische Kartiergenauigkeit nicht überbewertet werden. Ebenso sollte er aber auch nicht gänzlich ignoriert werden. Auf den Karten sollte die bildbedingt mögliche Genauigkeit (bzw. Ungenauigkeit) vermerkt werden, und es empfiehlt sich ein sachkritisches Abwägen vor allem hinsichtlich der Auswirkungen, die in den weiteren Arbeitsschritten, hier besonders bei den Probenahmen zur Gefährdungsabschätzung, aus der Diskrepanz zwischen Luftbild- und Kartier- bzw. Darstellungsmaßstab resultieren. Letztlich kann hier eine Kartierung im kleineren, aber „bildkonformen“ Maßstab im Gesamtprozess der Erfassungspraxis tragfähiger, weil realitätsnäher, sein als eine Kartierung in einem aus Sicht der Beprobungspraxis (vielleicht?) wünschenswerten, aber auswertungstechnisch letztlich nicht adäquaten größeren Maßstab.

5.2 Zur Erfassbarkeit altlastverdächtiger Objekte und Sachverhalte in digitalen Luftbildern

Wie in analogen Luftbildern sind potentielle Kontaminationen auch in digitalen Luftbildern normalerweise nicht direkt, sondern nur *indirekt* über die multitemporale Rekonstruktion der jeweiligen *Liegenschaftsnutzung(en)* einschließlich bildsichtbarer Auswirkungen *besonderer Ereignisse* zu erfassen²¹, konkret: durch die Lokalisierung und Identifizierung von

- Geländeverfüllungen und -aufschüttungen einschließlich Lagerplätzen (*Altablagerungen*),
- Gebäuden und Anlagen mit potentiell kontaminierenden Nutzungen/Funktionen im Rahmen gewerblich-industrieller Produktionsprozesse bzw. militärischer Aktivitäten (*Altstandorte/Altanlagen*),
- Gebäude-/Anlagenzerstörungen und sonstigen ereignisbedingten Auswirkungen auf Altstandorte bzw. Altablagerungen.

Um möglichst fundiert auf potentielle Kontaminationen und kontaminierte Bereiche rückschließen zu können, ist eine möglichst differenzierte Erfassung der Altablagerungen, Altstandorte/Altanlagen sowie der ereignisbedingten Folgeerscheinungen anzustreben. Inwieweit dies gelingt, hängt – abgesehen vom Kenntnis- und Erfahrungshorizont der Bildauswerter – zum einen ganz wesentlich davon ab, ob die Bilder monoskopisch oder aber stereosko-

²¹ Auswertungsmethodisch ist dies der in der Luftbilddauswertung seit längerem bekannte und erprobte Ansatz des Identifizierens durch Indikatoren (englisch auch: *proxy* oder *surrogate*, also „Stellvertreter“ oder „Ersatz“; vgl. Dodt, 1974; Campbell, 1987). Bei der Verdachtsflächenerfassung ist der Beziehungszusammenhang zwischen Indikator/*proxy* und gesuchter Information meistens nicht streng kausal, sondern eher wahrscheinlich, d.h., erfasste kontaminationsverdächtige Nutzungen oder besondere Ereignisse *können* im Einzelfall Bodenbelastungen verursacht haben; es *muss* dies aber nicht zwangsläufig der Fall sein.

pisch ausgewertet werden. Zum anderen spielt das Aussehen der zu erfassenden Objekte/ Sachverhalte in der Abbildungsperspektive der „Draufsicht“ im Einzel-Senkrecht-Luftbild bzw. im jeweiligen dreidimensionalen Luftbildmodell eine entscheidende Rolle.

Wird mit einem Standard-Programm/-Modul zur Bildbetrachtung *monoskopisch* ausgewertet, können ausgeprägtere Schlagschatten vielfach zwar einen durchaus „plastischen“ Geländeindruck vermitteln, sofern die Luftbilder am Bildschirm nicht eingeordnet, sondern „ingesüdet“ mit Ausrichtung der Schattenwürfe zum unteren Bildschirmrand hin betrachtet werden (s. Abb. 23). Dennoch sind in einer ersten, nur grob klassifizierenden Erfassungsstufe bei monoskopischer Bildanalyse *Altablagerungen* teilweise gar nicht oder aber – namentlich in ihrer räumlichen Ausdehnung – nur ungenau zu erfassen. Ähnliches gilt für einige der *Kriegseinwirkungen*. *Altstandorte/-anlagen* gewerblich-industrieller oder militärischer Art können demgegenüber in der ersten Erfassungsstufe auch bei monoskopischer Bildauswertung zumindest in ihren Grundrissdimensionen vergleichsweise vollständig und zuverlässig erfasst werden.



Abbildung 23: Schattenwurf und Bildwahrnehmung. In der Abbildung links ist der Luftbildausschnitt grob nach Süden ausgerichtet, so dass die Schlagschatten zum unteren Bildrand hin fallen; die Aufschüttungen (untere Bildhälfte) sowie die Abgrabung (im oberen Bilddrittel) erscheinen plastisch als Voll- bzw. Hohlformen. In der Abbildung rechts ist der Luftbildausschnitt, wie üblich und gewohnt, grob eingeordnet. Die Raumwahrnehmung ist deutlich weniger plastisch, bzw. es kann sogar zu einem pseudoskopischen Effekt („Umstülpfeffekt“) kommen, so dass die Hohlform als Vollform und die Vollformen als Hohlformen wahrgenommen werden. (Luftbildarchiv der AG Geomatik, RUB).

Werden die Luftbilder *stereoskopisch* ausgewertet, sind dank der 3D-Tiefenwahrnehmung *Altablagerungen* auf Anhieb nicht nur als Gesamtkategorie zu lokalisieren; sie können in weiteren Erfassungsstufen auch nach *Abgrabungen* und *Aufschüttungen* sowie – im multitemporalen Vergleich – *Verfüllungen* differenziert werden. Ferner ist es möglich, die Aufschüttungen aufgrund ihrer *Form* etwa nach Schüttkegel- oder Tafelhalden bzw. Hangdeponien zu klassifizieren oder sie *quantitativ* mittels entsprechender Bildmessungen aufgrund ihrer Dimensionen bzw. sowie Materialvolumina *Größenklassen* zuzuordnen. Vielfach kann durchaus auch *qualitativ* nach der *Art* der Abgrabungen, Verfüllungen bzw. Aufschüttungen diffe-

renziert werden, so etwa nach Steinbrüchen, Sand-/ Kiesgruben oder nach Mülldeponien, Berge- oder Schlackehalden u.ä.m. (vgl. Abb. 24 und 25). Ebenso sind als mögliche „Verfüll- und Ablagerungsorte“ Bombentrichter oder militärische Feldbefestigungen wie Panzer-, Schützen- bzw. Deckungsgräben (vgl. Abb. 26) und gewerblich-industrielle oder sonstige Lagerplätze direkt zu identifizieren und zu unterscheiden (vgl. Abb. 27).

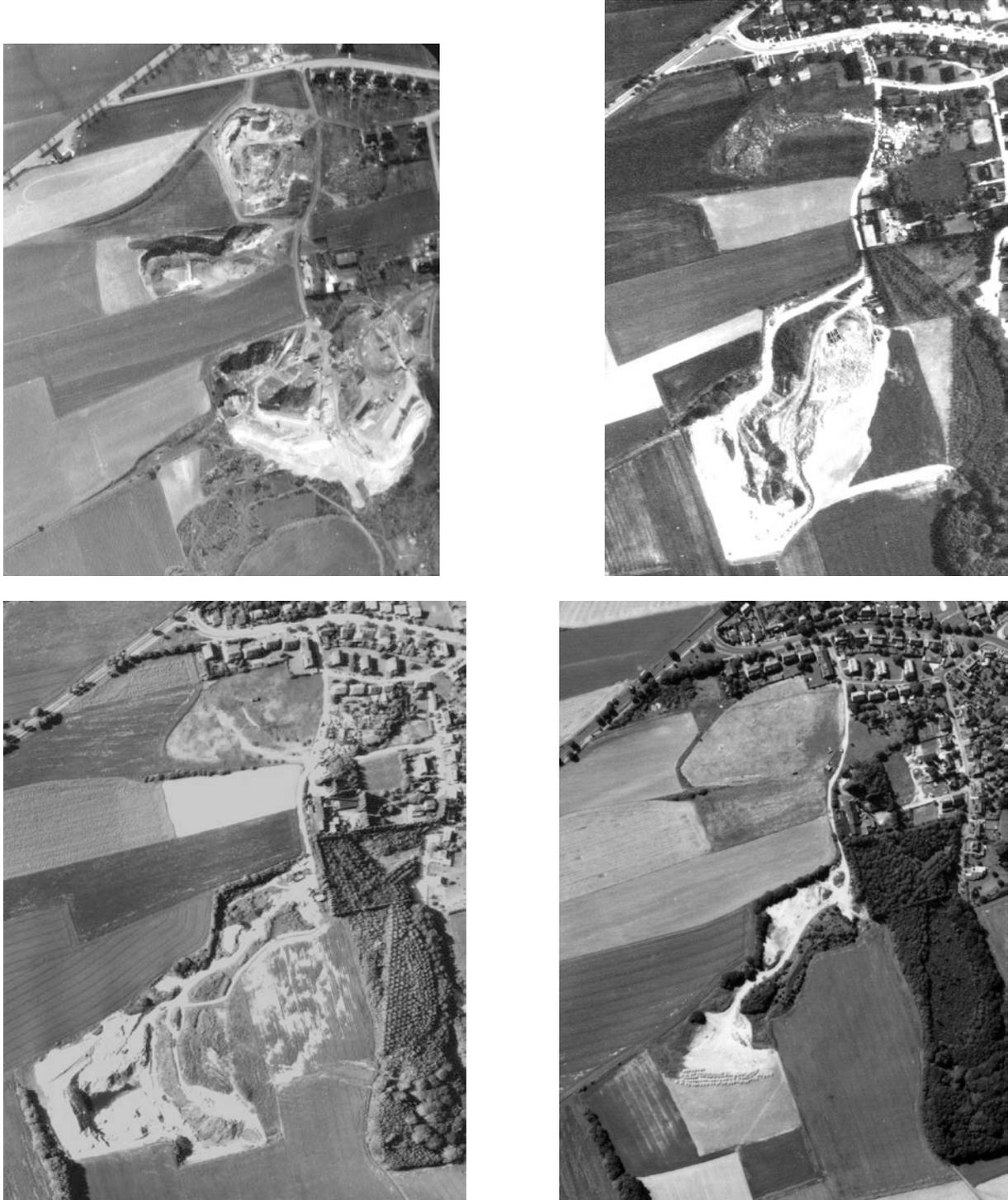


Abbildung 24: Altablagerungen – räumliche Entwicklung einer Sand-/Kiesgrube und deren sukzessive Verfüllung in vier Zeitschnitten (1959: o.l., 1976: o.r., 1983: u.l., 1993: u.r.). Die Abgrabung und Verfüllung verlagert sich von Süden (im Bild oben) nach Norden und von Osten nach Westen. (Bildausschnitte; Luftbildarchiv der AG Geomatik, RUB).

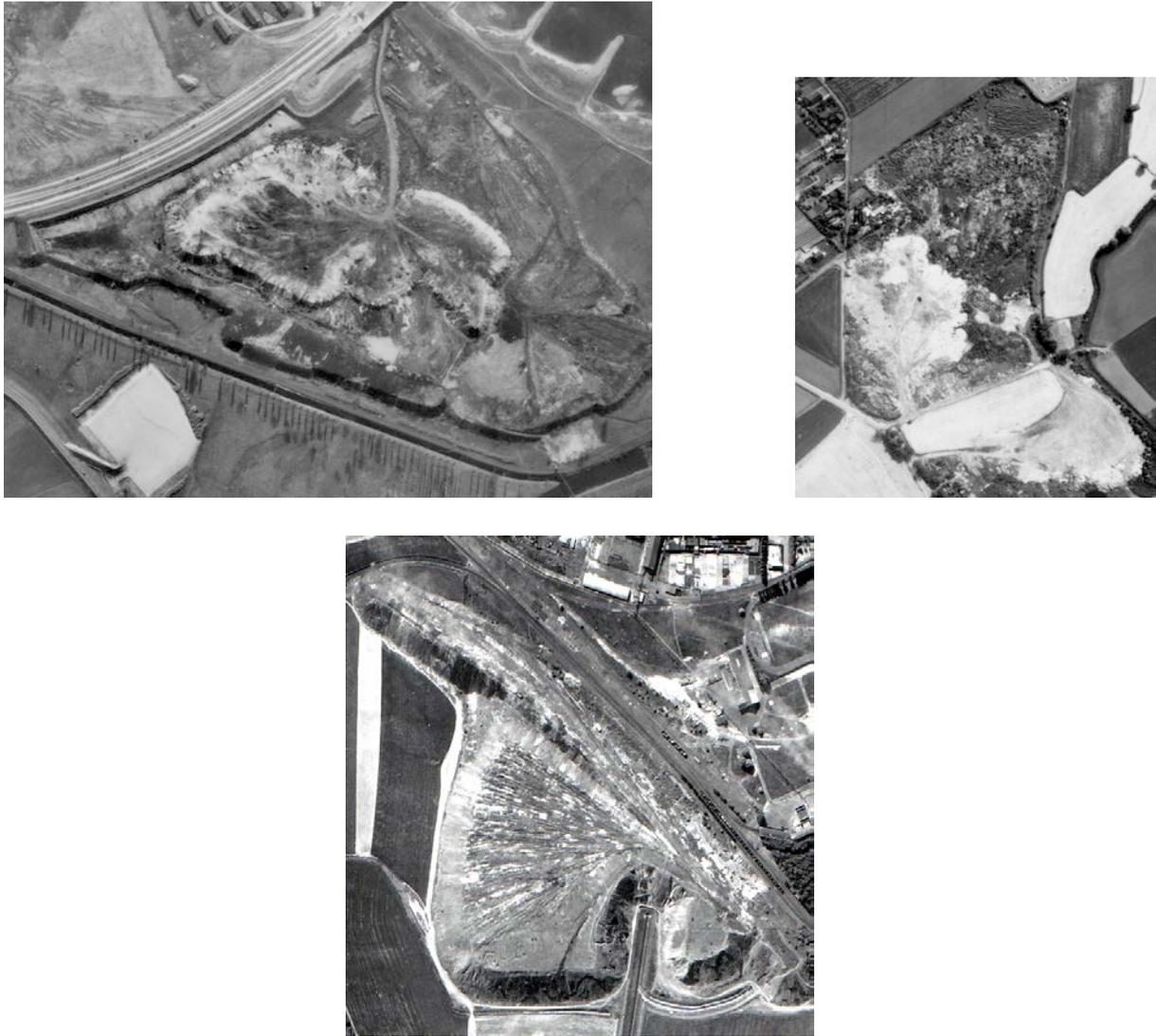


Abbildung 25: Altablagerungen – Beispiele unterschiedlicher Aufschüttungen: größere, ge-regelte und überwachte Haus-/Gewerbemülldeponien (o.l.), nicht überwachte („wilde“) Kippe (o.r.), Abraumhalde eines Steinkohlenbergwerks (u.). Bildausschnitte; Luftbildarchiv der AG Geomatik, RUB.

Eine noch weitergehende Klassifizierung der Altablagerungen, die zu spezifizierenden Aussagen über *Art und Zusammensetzung* der verfüllten bzw. aufgeschütteten *Materialien* führt, wäre erfassungstechnisch zwar wünschens- und erstrebenswert. Sie ist aber nur in seltenen Ausnahmefällen und dann gemeinhin auch nur mit (ziemlich) eingeschränkter Zuverlässigkeit möglich. Hauptgrund hierfür ist der Tatbestand, dass die meisten interpretationsrelevanten bildsichtbaren Merkmale bzw. Merkmalsausprägungen und -kombinationen bei Altablagerungen *mehrdeutig* sind, d.h. auf mehrere, verschiedenartige Ablagerungskategorien und -materialien zutreffen können, und damit normalerweise keine fundiert-abgesicherten, sondern nur mehr oder minder hypothetische Rückschlüsse auf bestimmte Materialien gestatten.

Wie vorangehend dargelegt, sind in der ersten – nur grob klassifizierenden – Erfassungsstufe *Altstandorte/Altanlagen* zivil-gewerblicher wie militärischer Art zwar auch monoskopisch zu lokalisieren. Die *stereoskopische Bildauswertung* ist hier im Regelfall allerdings effizienter

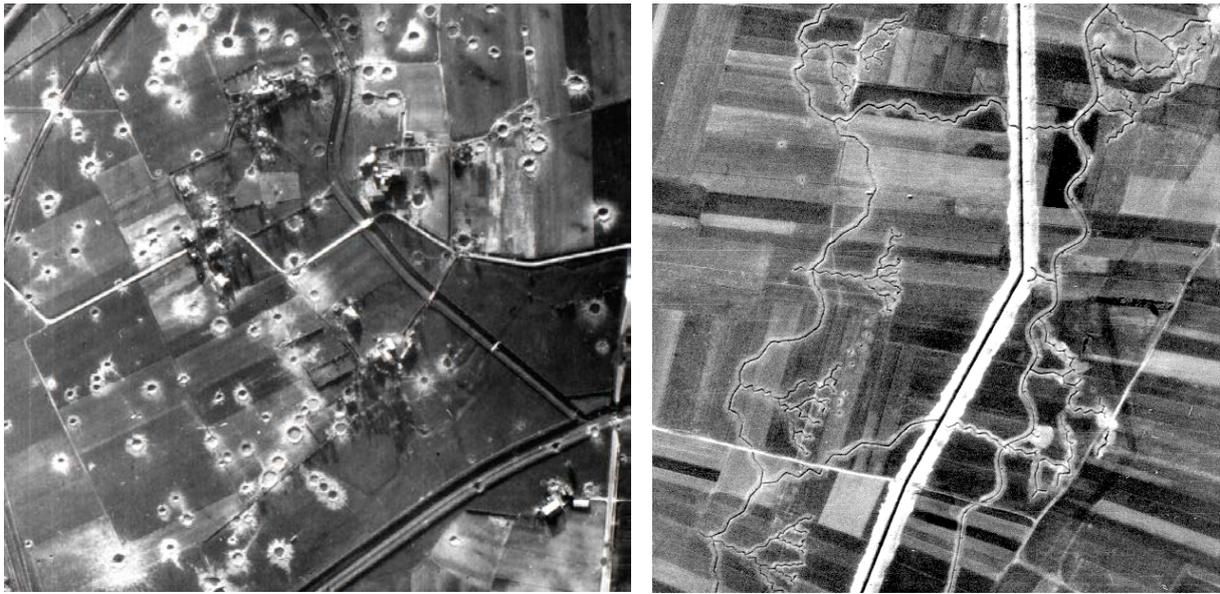


Abbildung 26: Altlagerungen – kriegsbedingte Hohlformen als potentielle Ablagerungs-orte. Die Bildausschnitte zeigen Bombentrichter mit unterschiedlichen Durchmesser und Tiefen (l.) sowie ein Erdverteidigungssystem mit einem Panzergraben sowie Schützen-/ Splitter- und Laufgräben (r.), die nach Kriegsende verfüllt werden mussten. Dazu wurden vielfach „standortfremde“, im Einzelfall durchaus auch kontaminationsverdächtige Materialien (z.B. Schlacken, Industrierümmer, militärisches Gerät) benutzt. Bildvorlagen: LANUV NRW –TD-Bestand.

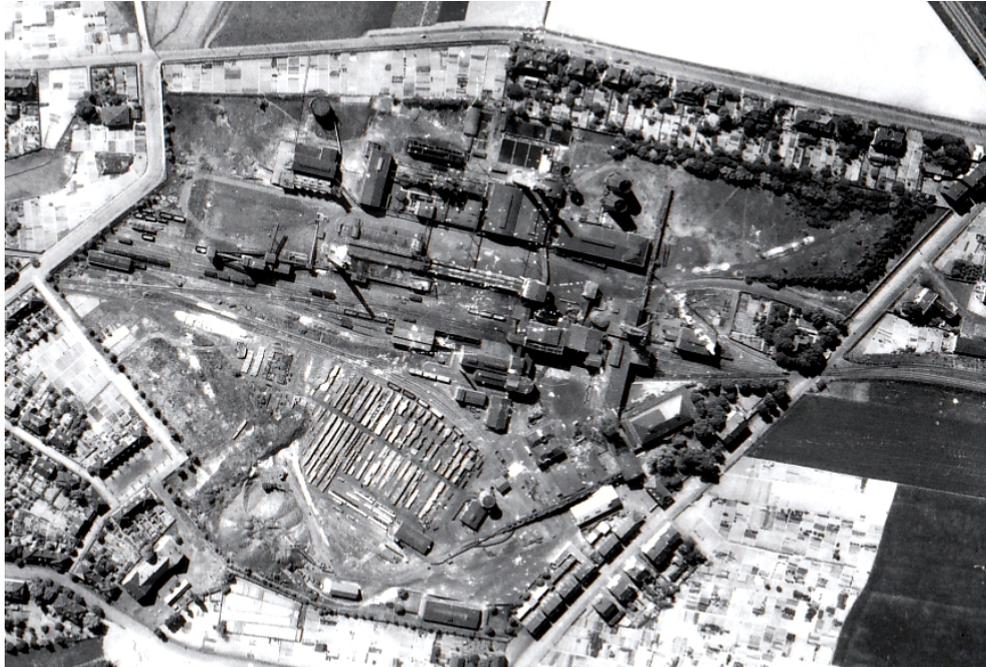


Abbildung 27: Altstandorte – Beispiel einer klassifizierbaren Betriebsfläche: Steinkohlenzeche. Im Bildausschnitt sind namentlich bei stereoskopischer Auswertung auf Antriebs betriebstypische Einzelanlagen zu erkennen, so der Förderbereich mit Fördergerüsten, ferner die Kohlaufbereitung (-wäsche, -sieberei) und die Kraftwerksbauten oder zum unteren Bildrand hin der Materiallagerplatz (mit Sägerei). Bildvorlage: Luftbildarchiv der AG Geomatik, RUB.

und effektiver, d.h. schneller und zuverlässiger, also letztlich auch kostengünstiger, weil die Höhendimensionen der Objekte/ Objektdetails als Identifizierungsmerkmal hinzukommen. Allerdings ist zu beachten, dass – anders als bei den Altablagerungen – auch bei stereoskopischer Bildauswertung in der ersten Erfassungsstufe Altstandorte/Altanlagen als Grundkategorie nur ermittelt werden können, wenn die Gebäude bzw. Gebäudekomplexe Größendimensionen, charakteristische baulich-technische Merkmale bzw. Anordnungsmuster aufweisen, durch die sie sich eindeutig von Wohn- und Geschäftshäusern oder sonstigen Gebäuden/Gebäudekomplexen unterscheiden. Ist dies nicht Fall, können zwar einige der kleineren potentiell kontaminationsverdächtigen Altstandorte/Altanlagen wie etwa Tankstellen dank ihres typischen Anlagebildes direkt identifiziert werden; bei den meisten kleinen bis mittleren gewerblich-handwerklichen Verdachtsstandorten, so etwa Lackierereien, chemischen Reinigungen u.v.a.m., ist dies normalerweise aber bestenfalls indirekt, etwa aufgrund der Hinterhofbebauung und -nutzung, und ohne weitere Spezifizierung möglich.

Größere *Fabriken* und *Fabrikkomplexe* können demgegenüber im Stereomodell auf Anhieb als solche identifiziert und erfasst werden. Eine weitergehende *Klassifizierung nach Branchen* und damit eine Einordnung nach möglichen Kontaminationsklassen bzw. kontaminierenden Stoffen/Stoffgruppen ist allerdings nur dann möglich, wenn der Gebäude- und Anlagenbestand Komponenten umfasst, die aufgrund ihrer spezifischen bildsichtbaren baulich-konstruktiven Merkmale nur *einer* Branche zugeordnet werden können. Dies gilt vor allem für eine Reihe von Standorten der Schwerindustrie, so beispielsweise Betriebsflächen des Steinkohlenbergbaus (s. Abb. 27), der Kohleveredlung (s. Abb. 28), Hüttenwerke (s. Abb. 29)



Abbildung 28: Altstandorte – Beispiel einer klassifizierbaren Betriebsfläche: Kokerei. Im Einzelbild sowie vor allem im Stereobildpaar sind am oberen Rand die Koksofenbatterie mit den Löschtürmen und der Ausdrückanlage identifizierbar. Zum unteren Bildrand hin sind außer verschiedenen Gebäuden Anlagen der Nebengewinnung (Wascher, Kühler, Tankbehälter) zu erkennen; um hier Funktionen genauer zuzuordnen, muss allerdings die standortspezifische Anlagenkonfiguration zum Aufnahmezeitpunkt bekannt sein. Bildvorlage: Luftbildarchiv der AG Geomatik, RUB.



Abbildung 29: Altstandorte – Beispiel einer klassifizierbaren Betriebsfläche: Hüttenwerk. Als produktions- und branchenspezifische Elemente sind im Bildausschnitt bei stereoskopischer Betrachtung eine Hochofenanlage mit fünf Hochöfen, den Winderhitzern und Abstichhallen oder auch mehrere Möllerbunker mit Gleisanschlüssen (besonders auffallend in der linken unteren Ecke) zu identifizieren. Die Nutzungen weiterer Gebäude und Anlagen können wenn überhaupt, dann nur indirekt und entsprechend unsicher erschlossen werden. Dementsprechend ermöglicht das Luftbild zwar pauschal eine Branchen-Einordnung des Betriebsgeländes, darüber hinaus aber – als Komplementärquelle – lediglich eine Überprüfung der aus anderen Quellen gewonnenen Erkenntnisse. Bildvorlage: Luftbildarchiv der AG Geomatik, RUB.

oder Erdölraffinerien (s. Abb. 30) und ähnliche Industrieanlagen mit spezifischen baulich-anlagentechnischen Charakteristika. Bei anderen Standorten der Schwerindustrie sowie vor allem auch den allermeisten Betrieben der Leicht-/Konsumgüterindustrie ermöglicht das Luftbildmodell zwar eine Analyse der Gebäude nach den Dimensionen Länge, Breite, Höhe sowie nach Dachformen, ferner die Erfassung von Freiluftanlagen wie Gleisanschlüssen/Werksbahnen, Rohrleitungen u.ä. oder auch von Freiluftlagerflächen (vgl. Abb. 31). In der Regel erweisen sich diese bildsichtbaren Objektmerkmale einschließlich der ebenfalls bildevidenten Anlagenkonfigurationen allerdings als semantisch mehrdeutig: Sie sind nicht nur für eine, sondern für *mehrere*, durchaus auch verschiedenartige industriegewerbliche Standortkategorien kennzeichnend und gestatten dementsprechend keine hinreichend zuverlässige Branchenzuordnung.

Ebenso ist es generell, d.h. auch bei Altstandorten, die eindeutig klassifiziert werden können, meistens nicht möglich, im Luftbildmodell die *Funktion(en)* und *Nutzung(en)* aller Gebäude/Bauwerke so differenziert zu ermitteln, dass diese, wie bei einer einzelfallbezogenen Erfassung erforderlich, zuverlässig hinsichtlich ihres Kontaminationspotentials eingeordnet werden können. Zwar ist bei Kenntnis der Produktionsabläufe manchmal aus der räumlichen



Abbildung 30: Altstandorte – Beispiel einer klassifizierbaren Betriebsfläche: Erdölraffinerie. Ausgedehnte, überwiegend von Schutzwällen umgebene Lagerbereiche mit Tanks unterschiedlicher Größe, bei Vergrößerung im Stereomodell gut erkennbare Rohrleitungssysteme sowie hochaufragend-zylindrische Produktionsanlagen (Kolonnen/Destillationstürme) im zentralen Bereich des Standortes weisen das (zum Aufnahmezeitpunkt wohl im Um-/Ausbau befindliche) Betriebsgelände auf Anrieb als Erdölraffinerie aus. Eine detailliertere funktionale Einordnung und Identifizierung der Anlagen sowie weiterer Gebäude kann allerdings nur mehr oder weniger hypothetisch sein. Bildvorlage: Luftbildarchiv der AG Geomatik, RUB.

Anordnung der Gebäude/Anlagen auf deren mögliche Funktionen/Nutzungen rückzuschließen. Letztlich bleiben derartige Rückschlüsse aber hypothetisch und entsprechend unsicher, denn es muss damit gerechnet werden, dass auch bei Betrieben ein und derselben Branche die Gebäude- und Anlagekonfigurationen standortspezifisch variieren können. Zudem ist nicht auszuschließen, dass die Funktionen/Nutzungen von Gebäuden im Laufe der Zeit verändert wurden, ohne dass sich dies bildsichtbar in deren Aussehen niedergeschlagen hätte.

Kurz: Nur vergleichsweise wenige industriegewerbliche Altstandorte können im Luftbildmodell wünschenswert genau und verlässlich nach ihrer Branche/Produktion und damit ihrem Kontaminationspotential klassifiziert und identifiziert werden. Noch mehr gilt dies für einen Großteil des jeweiligen Gebäude- und Anlagenbestandes. Für die Praxis der *Nutzung* von Luftbildern zur *Erfassung von Altstandorten* bedeutet dies: Man wird hier die Luftbilder im Regelfall als *Komplementärquellen* heranziehen, um die aus anderen Informationsquellen wie Betriebs- und Anlagenplänen sowie einschlägigem Schriftgut abgeleiteten Befunde zu überprüfen, gegebenenfalls zu korrigieren oder zu ergänzen. Als *Primärquellen* sollten sie nur dann genutzt werden, wenn für bestimmte Zeitspannen oder durchgehend keine anderen (aussagekräftigeren) Quellen verfügbar sind. Dabei ist ein vergleichsweise hoher Zeitaufwand (bei generell eingeschränkter Vollständigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse) zu



Abbildung 31: Altstandorte – Beispiel einer nicht klassifizierbaren Betriebsfläche. Das Fabrikgelände umfasst mehrere Gebäudekomplexe unterschiedlicher Form und Größe sowie mit unterschiedlichen Dachformen (Spitz- und Sheddächer, länglich-gestreckte Dachfirstaufbauten) sowie (in der oberen linken Bildecke) einen Stückgut-Lagerplatz und eine kleine Betriebsdeponie. Eines der Fabrikgebäude weist einen höheren Kamin auf (s. Schattenwurf). Diese bildsichtbaren Merkmale verweisen zwar auf einen (größeren) Mittelbetrieb der Metallverarbeitung; eine genauere Klassifizierung oder gar die zuverlässige Ermittlung der Gebäudefunktionen – und damit ein tragfähiger Rückschluss auf mögliche Kontaminationsquellen – ist allerdings nicht möglich. Hier können Luftbilder nur als Komplementärquellen fungieren, um aus anderen Quellen abgeleiteten Untersuchungsbefunde zu überprüfen. Bildvorlage: Luftbildarchiv der AG Geomatik, RUB.

veranschlagen, da mögliche kontaminationsverdächtige Nutzungen bestenfalls indirekt – aufgrund einer Konvergenz verschiedener bildsichtbarer Indizien und deren Interpretation – ermittelt werden können.

Ähnlich wie bei den industriegewerblichen ist auch bei den *militärischen Altstandorten* ein Teil *unmittelbar* sachlich-funktional einzuordnen und zu identifizieren, weil sie typische, d.h. objekt- und nutzungsspezifische bildsichtbare Elemente bzw. Merkmale und Merkmalskombinationen erkennen lassen. Als Beispiele seien genannt: Kasernen und Truppenübungsplätze, Munitionsanstalten (s. Abb. 32), Fliegerhorste (s. Abb. 33, Flakstellungen (s. Abb. 34) oder Schießstände (s. Abb. 35). Sollen, wie in einzelfallbezogenen Recherchen unabdingbar, innerhalb der jeweiligen militärischen Altstandorte die *Funktionen/Nutzungen der einzelnen Gebäude* und sonstigen *Anlagen/Objekte* ermittelt werden, zeigen sich die gleichen Möglichkeiten und Grenzen wie bei industriegewerblichen Standorten: Eine hinreichend zuverlässige Identifizierung ist nur dann möglich, wenn die einzelnen Gebäude/Anlagen im Bild erkennbare funktionsspezifisch-eindeutige (bauliche) Merkmale bzw. funktionstypisch-eindeutige räumliche Konfigurationen aufweisen. Dies ist vielfach nicht der Fall, so namentlich bei „Standard“-Bauwerken wie Unterkunfts- und Wirtschafts- und Werkstattgebäuden, Fahr-

zeughallen u.ä.m. Mithin sollten die Luftbilder im Rahmen der Erfassung hier, wie auch bei industriegewerblichen Altstandorten, in erster Linie als *Komplementärquellen* zur Überprüfung, Korrektur oder Ergänzung der aus anderen Quellen gewonnenen Ergebnisse herangezogen werden.

Sollen durch stereoskopische Luftbildauswertung Erkenntnisse über besondere potentiell kontaminierende *Ereignisse* wie Betriebsstörungen und -unfälle oder Kriegseinwirkungen gewonnen werden, ist grundsätzlich zu bedenken, dass ein Teil dieser Vorfälle in Luftbildern nicht zu erfassen sein wird, weil sie sich nicht unter freiem Himmel, sondern *innerhalb* von Produktions-, Lagerhallen oder anderen Betriebsanlagen ereignet haben und dadurch nicht bildsichtbar geworden sind. Ferner ist zu bedenken, dass störungs- und unfallbedingte Schäden in der Regel möglichst schnell beseitigt wurden. Das heißt, selbst wenn sie, etwa aufgrund ihrer Art und ihres Ausmaßes oder weil sie sich im Freien zugetragen haben, bildsichtbar waren, sind sie in Luftbildern nur dann (noch) erfassbar, wenn die Befliegungen zeitnah zu den jeweiligen Ereignissen durchgeführt wurden. Letzteres gilt auch für die Er-



Abbildung 32: Militärische Anlagen – Munitionsanstalt. Die abgebildete Anlage hat die typische Konfigurationen einer Munitionsanstalt (Muna) zur Lagerung und Fertigstellung von einsatzfähiger Munition. Die Mehrzahl der Lagerhäuser/-bunker ist erdbedeckt und innerhalb des Waldareals vielfach nur im Stereobild (aufgrund von Höhenunterschieden der Baumkronendecke) zu lokalisieren. Der Fertigungsbereich (hier: links oben) ist meistens leichter zu ermitteln. Allerdings sind kaum zuverlässige Aussagen über die spezifischen Funktionen der Munitionsarbeitshäuser möglich. Demgemäß sollte die Luftbildauswertung hier primär zur Überprüfung von Plan- und Aktenüberlieferungen dienen. Bildvorlage: LANUV NRW –TD-Bestand.

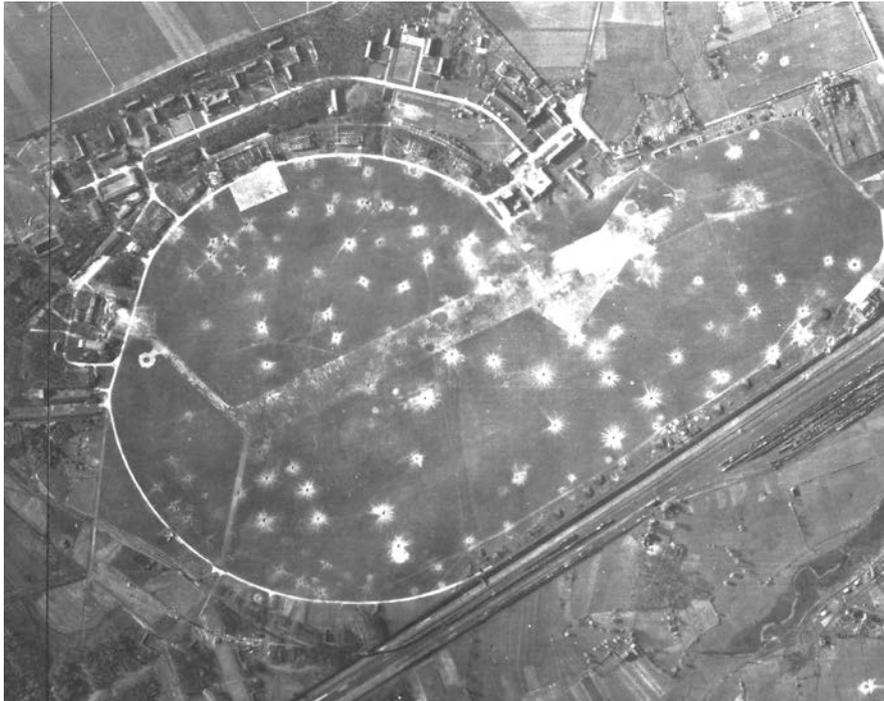


Abbildung 33: Militärische Anlagen – Fliegerhorst. Der Bildausschnitt zeigt einen Fliegerhorst mit einer Start-/Landebahn, Flugzeug- und Werkstatthallen. An den Rändern des Flugfeldes (z.B. parallel zur Bahnstrecke) sind Flugzeugabstellplätze (überwiegend mit Splitter-schutzwällen), ferner Betankungsanlagen (z.B. im linken unteren Bogen des Flugfeldes), der Kompassjustierstand (ebenfalls linker Rand des Flugfeldes) und ein MG-Schießstand (Mitte des linken Bildrands) auszumachen. Zum oberen Bildrand hin schließt mit mehreren Gebäudekomplexen ein Unterkunftsbereich an. Bildvorlage: LANUV NRW –TD-Bestand.

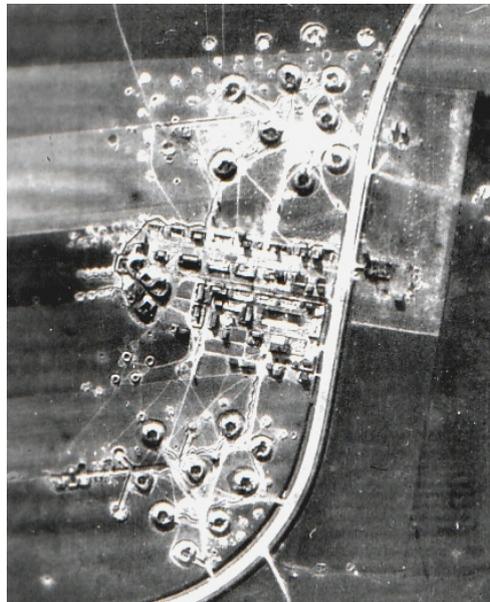


Abbildung 34: Militärische Anlagen – Flakstellung. Der Bildausschnitt zeigt eine Flak-Doppelbatterie mit je acht Feuerstellungen. Zwischen den beiden Batterien sind verschiedene Bauwerke zu erkennen. Die Funktionen dieser Bauten (z.B. Befehlsstelle, Wohnbaracken, Lagerung von Munition) sind im Bild allerdings nicht zuverlässig zu ermitteln, sondern können meistens nur vermutet werden. Bildvorlage: LANUV NRW –TD-Bestand.



Abbildung 35: Militärische Anlagen – Schießstand. Der Bildausschnitt aus der Aufnahme eines Truppenübungsplatzes zeigt eine offene Schießanlage. Der Zielbereich (mit Schutzwall) befindet sich links. Über die Funktionen/Nutzungen der Gebäude ist bestenfalls zu mutmaßen. Bildvorlage: LANUV NRW –TD-Bestand.

fassbarkeit mancher *Kriegsfolgeschäden*. Daher empfiehlt es sich hier in der Praxis der Bildauswertung, vorab die Zeitpunkte der verfügbaren Luftaufnahmen anhand der lokalen Kriegsschroniken mit denen der dokumentierten Luftangriffe bzw. Erdkämpfe abzugleichen. Da die strategische Luftaufklärung der Alliierten bestrebt war, die Auswirkungen der Luftangriffe möglichst umgehend analysieren zu können, findet sich im Normalfall vor allem nach Großangriffen allerdings hinreichend zeitnah aufgenommenes Bildmaterial. Dies gilt namentlich für die letzten Kriegsmonate ab Ende 1944/ Anfang 1945. Dementsprechend ist es in der Regel möglich, anhand der Luftbilder die Auswirkungen von Angriffsschäden umfassend zu ermitteln und quantitativ nach dem *Schadensausmaß* sowie (oft) auch qualitativ nach der Art der *Schadensverursachung* (Spreng- oder/und Brandbomben) zu differenzieren (s. Abb. 36). Dabei fungieren die Luftbilder in den meisten Standortrecherchen als *Primärquellen*, da die Dokumentation von Kriegsfolgeschäden im schriftlichen Archivgut – sofern überhaupt vorhanden – oft lückenhaft ist und vielfach keine hinreichend genaue Verortung gestattet.

Zusammengefasst: Wie in analoger sind die Luftbilder auch in digitaler Form ein ganz wesentliches Hilfsmittel der einzelfallbezogenen Verdachtsflächenerfassung. Dabei erweisen sie sich als besonders aussagekräftig-ergiebige Quellen, wenn andere „klassische“ Quellen der Verdachtsflächenerfassung, hier insbesondere das Schrift-/Archivgut oder auch die großmaßstäbigen amtlichen Kartenwerke, sach- und/oder zeitbedingt deutliche Lücken aufweisen. So sind sie, stereoskopisch ausgewertet, de facto unverzichtbar, um

- Altlagerungen zu lokalisieren und nach qualitativ-formalen und/oder quantitativen Merkmalen zu klassifizieren
- die (bildsichtbaren) Auswirkungen besonderer Ereignisse, darunter namentlich Kriegsfolgeschäden, erfassen und nach Art und Ausmaß zu differenzieren
- bei der Bearbeitung von gewerblich-industriellen wie auch militärischen Altstandorten als Komplementärquellen anderweitig gewonnene Untersuchungsbefunde sachgerecht überprüfen, präzisieren und ergänzen bzw. korrigieren zu können.

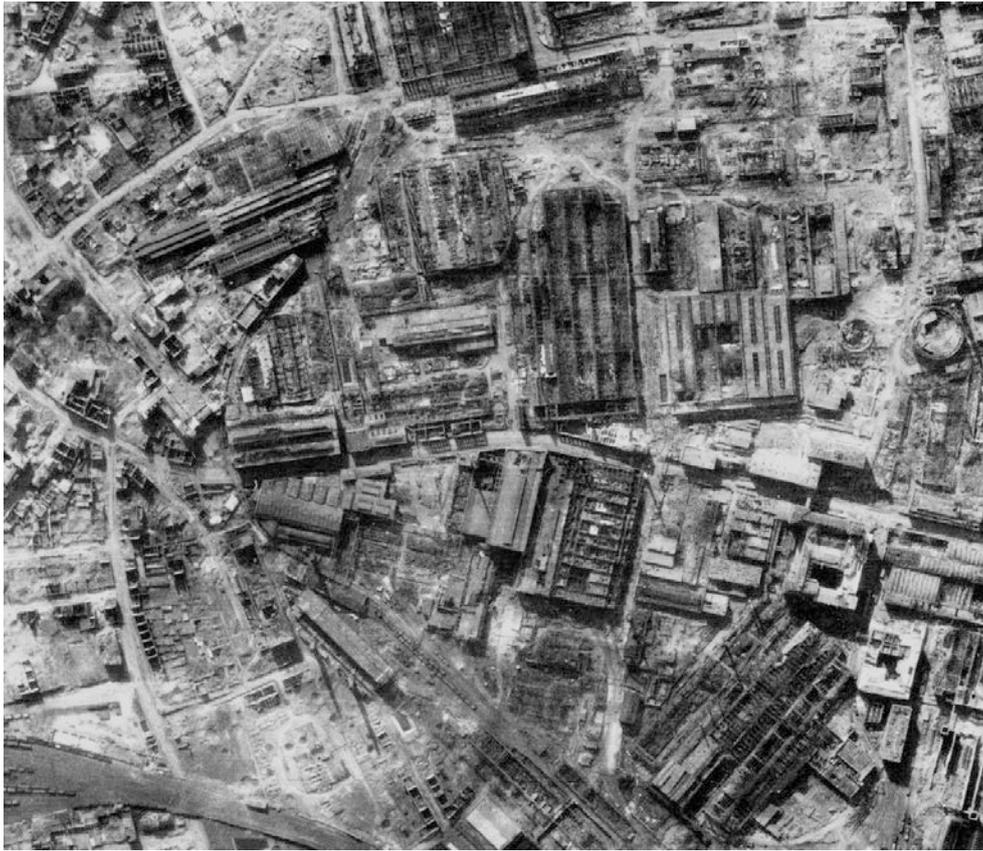


Abbildung 36: Altanlagen – Folgeschäden nach Bombenangriffen. Der Bildausschnitt zeigt einen Ausschnitt aus einem überwiegend industriegewerblich geprägten innerstädtischen Bereich im Frühjahr 1945. Ein (Groß)Teil der Fabrikhallen und sonstigen Gebäude/Anlagen (z.B. Tanks, Gasometer [?]) ist total oder weitestgehend zerstört; andere weisen mehr oder weniger ausgeprägte Teilschäden auf. Soweit die Außen- und tragende Innenmauern oder auch Dachträger noch erhalten sind, ist die Zerstörung in der Hauptsache auf Brandbomben, bei eingestürzten Mauern (Trümmerhaufen; z.B. rechte obere Bildecke) oder (kleineren) Teilschäden auf Sprengbomben zurückzuführen. Bildvorlage: LANUV NRW –TD-Bestand.

Dabei hat die *Auswertung digitaler bzw. digitalisierter Luftbilder* gegenüber der tradierten analogen multitemporalen Luftbildauswertung eine Reihe offenkundiger *Vorteile*: Die Bilder können bei Bedarf im Auswertungsprozess radiometrisch-photographisch optimiert werden. Sie sind bei sachgemäßer Datenhaltung schnell aufzurufen und über entsprechende Funktionen des Bildbetrachtungsprogramms auch bequem und zuverlässig – etwa durch Bildüberlagerungen – miteinander zu vergleichen. Ebenso wird der Vergleich mit topographischen Karten und Betriebsplänen erheblich erleichtert und beschleunigt. Zudem lassen sich die Ergebnisse der digitalen Bildauswertung problemlos in ein GIS-System integrieren, so dass alle weiteren Schritte der Verdachtsflächenbearbeitung in *einem* System ausgeführt werden können – mit einer entsprechenden Fehler-Minimierung und einer Optimierung der Arbeitsökonomie. Im Ergebnis ergibt sich ein nach Aufnahmetermeninen differenziertes GIS, das die Kartierinhalte strukturiert speichert und semantisch entsprechend der vorgegebenen Kartierlegende beschreibt.

6 Hinweise zur Durchführung der digitalen Luftbildauswertung in der Erfassungspraxis

Seit den Anfängen der Verdachtsflächenerfassung steht außer Frage, dass eine einzelfallbezogene Verdachtsflächenerfassung, die sachlich-inhaltlich wie auch räumlich-geometrisch den Anforderungen einer tragfähigen Standortdokumentation genügen soll, ohne eine hinreichend qualifizierte Auswertung von Luftbildern nicht (oder bestenfalls ausnahmsweise) möglich ist. Mithin stellt sich im Regelfall die Frage, wo die notwendige Luftbildauswertung vorgenommen wird, konkret: ob die Auswertungsarbeiten

- behördenintern in Eigenleistung durchgeführt oder aber
- extern an sachverständige Ingenieurbüro/Institute

vergeben werden sollten. In der Erfassungspraxis ergibt sich die Antwort auf diese Frage aus dem – letztlich banalen, weil elementaren – Tatbestand, dass bestimmte Rahmenbedingungen gegeben sein müssen, um eine fachlich angemessene Luftbildauswertung – digital wie analog – gewährleisten zu können. Pauschal formuliert sind dies

- eine der Erfassungs- und Auswertungsvariante (qualitativ-beschreibend oder quantitativ-kartierend) genügende *hard- und softwaretechnische Ausstattung* sowie
- *qualifiziertes Personal*, das nicht nur mit der Verdachtsflächenproblematik, sondern auch mit der digitalen Luftbildauswertung/Photogrammetrie vertraut ist.

In der Erfassungspraxis wird die Luftbildauswertung normalerweise *behördenintern* durchgeführt, sofern hier die vorgenannten Voraussetzungen gegeben sind. Ist dies nicht bzw. nur unzulänglich der Fall, ist die Bildauswertung *extern* zu *beauftragen*. Hierbei kommen verschiedene Varianten in Frage: Gibt es behördenintern weder eine hinreichende hard- und softwaretechnische noch eine fach- und sachangemessene personelle Ausstattung, wird es im Regelfall zweckmäßig sein, die Luftbildauswertung mit allen Teilleistungen (s. Tab. 11) zu vergeben. Sind im behördlichen Rahmen eine Standard-Hard- und Software-Ausstattung für GIS mit einem Modul zur Bildauswertung sowie entsprechend geschulte, zudem mit der Altlastenproblematik und den örtlichen Gegebenheiten vertraute Mitarbeiter vorhanden, kann es nicht nur kostenreduzierend, sondern durchaus auch effizienzsteigernd sein, wenn die thematische Kartierung (Tab. 11, Leistung 6) der kontaminationsverdächtigen Areale behördenintern vor Ort durchgeführt wird und in der Hauptsache die Leistungen 4 sowie vor allem 5 extern vergeben werden. Ebenso kann es dank der den Behörden zugänglichen Findhilfen (s. Kap. 3.2) vielfach auch sinnvoll sein, die Teilleistung 1 behördenintern zu erbringen.

Sollen Leistungen ausgeschrieben und extern vergeben werden, empfiehlt sich der Rückgriff auf die entsprechenden Hinweise der Landesumweltverwaltung. Die normalerweise zu stellenden *personellen Anforderungen* an die allgemeinen und besonderen fachlichen Kenntnisse möglicher *Auftragnehmer*, ihre Fachkunde, bisherige Tätigkeit, praktische Erfahrung, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit, sind in MALBO 11 (1995) sowie im Merkblatt Nr. 9 des Landesumweltamtes (LUA, 1997) dargelegt und müssen daher hier nicht weiter ausgeführt werden. Sie können mit einigen Abänderungen übernommen werden. Letztere betreffen hauptsächlich die besonderen fachlich-methodischen Kenntnisse und Fertigkeiten des Auftragnehmers bzw. seiner Mitarbeiter: Diese müssen – über die Standardkenntnisse zur analogen Luftbildauswertung hinaus – die Methoden und Techniken der digitalen Luftbildauswer-

tung sowie das notwendige Instrumentarium der digitalen Bildanalyse beherrschen (vgl. Dodt/Jürgens/Redecker, 2011).

Tabelle 11: Anforderungen an die digitale Luftbilddauswertung bei Standortrecherchen

Teilleistungen	Leistungsbeschreibung
1 Bildermittlung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammenstellung des gesamten im Zeitraum kontaminationsverdächtiger Nutzungen aufgenommenen Bildmaterials (Stereoabdeckung) + bei Bedarf: jüngste Befliegung ▪ genauere Spezifikation gemäß Kap. 3.2
2 Bildauswahl	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewertung der Bildqualität, insbes. Bodenauflösung ▪ Entscheidungskriterien und Begründung der Bildauswahl ▪ genauere Spezifikation gemäß Kap. 3.3
3 bei Bedarf: Digitalisieren analog vorliegender Bilder	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Scanner-Typ: Photogrammetrie- oder leistungsfähiger Desktop-Scanner ▪ Scandokumentation: Art der Scanvorlagen und Scanparameter Speicherformat(e); Datei-Größen/Bild ▪ genauere Spezifikation gemäß Kap. 3.1.2
4 radiometrisch-photographische Bildaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ eingesetzte Software mit Leistungsparametern ▪ Dokumentation der photographischen Bildaufbereitung: ▪ eingesetzte Verfahren + Ergebnisevaluierung ▪ genauere Spezifikation gemäß Kap. 4.2.2
5 geometrische Bildaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ eingesetzte Software mit Leistungsparametern ▪ Dokumentation der geometrischen Bildaufbereitung ▪ eingesetzte Verfahren + Genauigkeitsbetrachtung ▪ genauere Spezifikation gemäß Kap. 4.3.2
6 thematische Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ eingesetzte Software mit Leistungsparametern ▪ Kartierkategorien und Kartierungsergebnisse ▪ Evaluierung der geometrisch-räumlichen und semantischen Kartiergenauigkeit ▪ genauere Spezifikation gemäß Kap. 5

Technisch muss der Auftragnehmer über eine den qualitativen Ansprüchen der Aufgabenstellung genügende Hard- und Softwareausstattung verfügen. Zur notwendigen *Hardwareausstattung* gehört im Regelfall ein hochwertiger Desktop- oder ein Photogrammetrie-Scanner, um beispielsweise behördenintern bereits vorliegende analoge Luftbilder zu digitalisieren (Spezifizierung: s. Kap. 3.1.2). Für die Bildauswertung sollte ein digitales Stereoauswertesystem mit entsprechend leistungsfähigem PC, Monitor und dem zur Stereobildbetrachtung erforderlichen Zubehör letztlich Standard sein (Spezifikation: s. Kap. 4.1). Sind – wie bei Standortrecherchen normalerweise üblich – Altablagerungen, Altanlagen und sonstige kontaminationsverdächtige Bereiche der untersuchten Liegenschaft *lagegenau* zu lokalisieren und zu *kartieren*, ist als Software ein Photogrammetrie-Programm erforderlich, das

1. Verbesserungen der photographisch-radiometrischen Bildqualität,
2. die Orientierung überlappend aufgenommener Luftbilder zur Erstellung eines verzerrungsfreien, d.h. geometrisch lagegetreuen, dreidimensionalen Raummodells sowie
3. die qualitative und quantitative Erfassung, d.h. die Identifizierung/Interpretation und Kartierung, der kontaminationsverdächtigen Geländebereiche im Stereomodell

ermöglicht.

Sollen Luftbilder nur *qualitativ-beschreibend* zur Überprüfung anderweitig gewonnener Erfassungsbefunde ausgewertet werden, mögen im Einzelfall, etwa wenn ausschließlich Altanlagen zu verifizieren sind, als technische *Minimalausstattung* ein Standard-PC und -Monitor sowie eine Software zur monoskopischen Bildbetrachtung (einschließlich elementarer Funktionen der photographischen Bildverbesserung) hinreichend sein. Als *Standard* ist allerdings eine Hard- und Softwareausstattung zu fordern, die eine stereoskopische Bildbetrachtung (möglichst mit Shutter-Brille) – und damit auch die Überprüfung von Altanlagen – erlaubt. Zudem sollten im Bedarfsfall zumindest näherungsweise genaue Objektmessungen, also als Voraussetzung entsprechende (einfachere) geometrische Bildverbesserungen, möglich sein. (Spezifikation: s. Kap. 4.1).

Die Anforderungen an die *Aufbereitung* und *Präsentation der Ergebnisse* einer *digitalen* einzelfallbezogenen *Luftbildauswertung* sind im Wesentlichen identisch mit denen einer analogen Bildauswertung. Es sind die *allgemeinen* Standards einer gutachterlichen Ergebnisdarstellung zu beachten (s. MALBO 11, 1995) und darüber hinaus *speziell* die mit den vorangehend aufgeführten Teilleistungen durchgeführten Arbeiten umfassend und nachvollziehbar zu dokumentieren, so das ermittelte, ausgewählte und schließlich ausgewertete Bildmaterial, ferner dessen Aufbereitung und Qualität, sodann die jeweilige Hard- und Software-Ausstattung, die zur Bildverbesserung und -auswertung eingesetzten Verfahren sowie schließlich die erzielten Ergebnisse einschließlich einer kritischen Wertung, die auch Lücken und Unsicherheiten sowie deren mögliche Ursachen aufzeigt. Im Zusammenhang mit der kartographischen Ergebnis-Visualisierung ist hier – wie bei der analogen Kartierung – namentlich die Problematik der von den Luftbildmaßstäben abhängigen räumlich-geometrischen Kartiergenauigkeit der kontaminationsverdächtigen Objekte zu beachten und zu dokumentieren (s. Kap. 5.1).

7 Literatur

AFL (Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten) (Hrsg.): Das digitale Luftbild. Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich. (= Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 7). Göttingen 2012.

AH KMR (Arbeitshilfen zur wirtschaftlichen Erkundung, Planung und Räumung von Kampfmitteln auf Liegenschaften des Bundes), hrsg. vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesministerium der Verteidigung. Hannover 2007.

Albertz, J.: Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 4. Aufl., Darmstadt 2009.

Albertz, J. und M. Wiggenhagen: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. Heidelberg, 5. Aufl. 2009.

Campbell, J.B.: Introduction to Remote Sensing. New York, London, 1. Aufl. 1987.

DIN 18716-1: Photogrammetrie und Fernerkundung. Teil 1: Grundbegriffe und besondere Begriffe der photogrammetrischen Aufnahme. Berlin 1995.

DIN 18716-2: Photogrammetrie und Fernerkundung. Teil 2: Besondere Begriffe der photogrammetrischen Auswertung. Berlin 1996.

DIN 18740-1: Photogrammetrische Produkte – Teil 1: Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild. Berlin 2001.

DIN 18740-2: Photogrammetrische Produkte – Teil 2: Anforderungen an das gescannte Luftbild. Berlin 2005.

DIN 18740-3: Photogrammetrische Produkte – Teil 3: Anforderungen an das gescannte Orthophoto. Berlin 2003.

DIN 18740-4: Photogrammetrische Produkte – Teil 4: Digitale Luftbildkameras und digitale Luftbilder. Berlin 2007.

Dodt, J.: Luftbilddauswertung durch ‚Indikatoren‘. Möglichkeiten und Grenzen der Datengewinnung für die Raumplanung. In: Vermessungswesen und Raumordnung, 36. Jg., 12/1974, S. 433 – 444.

Dodt, J.: Luftbildinterpretation. In: Angewandte Fernerkundung. Methoden und Beispiele, bearb. von S. Schneider. Hannover, 1984, S. 44 – 55.

Dodt, J. et al.: Die Verwendung von Karten und Luftbildern bei der Ermittlung von Altlasten. Ein Leitfaden für die praktische Arbeit. Hrsg. vom Minister für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. 2 Bde, Düsseldorf 1987.

Dodt, J. und H. Mark: Zur Bedeutung von Fernerkundungsverfahren für das Flächenrecycling. In: BrachFlächenRecycling (1) 1994, S. 22 – 30.

Dodt, J., C. Jürgens und A. Redecker: Sachverständige für die Verdachtsflächenerfassung: Neue Anforderungen im Sachbereich Luftbilddauswertung? In: altlastenspektrum, 20. Jg., H.1, 2011, S. 19 – 25.

Franken, F. und K. Hoffmann: Anforderungen an das digitale/digitalisierte Luftbild. Ein Leitfa-den der Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten. In: Photogrammetrie•Fernerkundung •Geoinformation, Heft 4/2010, S. 267-271.

Geosystems (Hrsg.): Luftbilder in der digitalen Photogrammetrie. Worauf beim Kauf von Luftbildern zu achten ist. White Paper, 2001.

Gierloff-Emden, H.G.: Fernerkundungskartographie mit Satellitenaufnahmen. Allgemeine Grundlagen und Anwendungen. (= Enzyklopädie der Kartographie, Bd. IV/1). Wien 1989.

Graham, R. et al.: Detectors and Sensors. In: Manual of Photogrammetry, hrsg. von J.Ch. McGlone. 5. Aufl., Bethesda (MD) 2004, S. 505 – 580.

Hildebrandt, G.: Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartie-rung und Landschaftsökologie. 1. Aufl., Heidelberg 1996.

Jähne, B: Digitale Bildverarbeitung. Berlin, 6. Aufl. 2005

Jensen, J.R.: Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective. Lon-don/Sydney, 3. Aufl. 2004.

Kerth, M. et al. (2001): Ermittlung der Mächtigkeit anthropogener Auffüllungen mit Hilfe der Luftbilddauswertung. In: Terratech 1/2001, S. 37 – 39.

Kraus, H.: Scannen. Mit Desktop-Scannern zum perfekten Bild. Bonn/Paris 1996.

Kraus, K.; Jansa, J.; Kager, H.: Photogrammetrie. Verfeinerte Methoden und Anwendungen. 3. Aufl., Bonn 1996.

Kraus, K.: Photogrammetrie. Geometrische Informationen aus Photographien und La-serscanneraufnahmen. 7. Aufl., Berlin/New York 2004.

LUA NRW – Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Altlasten in NRW. Fachinforma-tionen und mehr. (CD-ROM) Essen 1995.

LUA NRW – Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Anforderungen an Sachver-ständige bei der Bearbeitung von Altlasten. (= Merkblätter Nr. 9). Essen 1997.

LANUV NRW: Hinweise zur Nutzung digitaler Kriegsluftbilder bei der Verdachtsflächenerfassung in Nordrhein-Westfalen, bearb. v. C. Jürgens, J. Dodt und A. Redecker. (= LANUV-Arbeitsblatt 11). Recklinghausen 2009.

LANUV NRW: Arbeitshilfe für flächendeckende Erhebungen über Altstandorte/Betriebsstandorte sowie Ablagerungen/unsachgemäße Materialablagerungen, bearb. von H. Mark und J. Dodt (= Arbeitsblatt Nr. 21, 2. überarbeitete Auflage MALBO 15). Recklinghausen 2013.

MALBO 11: Anforderungen an Gutachter, Untersuchungsstellen und Gutachten bei der Altlastenbearbeitung, hrsg. vom Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (= Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Bd. 11). Essen 1995.

MALBO 18: Kriegsbedingte Kontaminationsanteile auf altlastverdächtigen Altstandorten. Ein praxisbezogener Erfassungsansatz bei Standortrecherchen, bearb. von J. Dodt, H. Mark und G. Ruppel. (= Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Bd. 18). Essen 2003.

MALBO 22: Digitale Kriegsluftbilder NRW. Hinweise zur Nutzung bei der Altlastenerfassung, bearb. von J. Dodt. (= Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Bd. 22). Essen 2006.

MELF NRW (Der Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen), Hrsg.: Hinweise zur Ermittlung von Altlasten. Mai 1985.

MESA 9: Hinweise für die einzelfallbezogene Erfassung von Verdachtsflächen rüstungs- und kriegsbedingter Altlasten, bearb. von J. Dodt et al. (= Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten, Bd. 9). Düsseldorf 1994.

Neumann, K.: Scannen von Luftbildern nach DIN 18740-2. In: Photogrammetrie•Fernerkundung•Geoinformation, Heft 4/2005, S. 329 - 333.

Niwa, Y.: Creating Orthorectified Aerial Photography without a Camera Calibration Report. o.O., 2002.

o.V. (ohne Verfasserangabe): Auswertung von Satellitenaufnahmen zur Gewinnung von Flächennutzungsdaten. (= Schriftenreihe des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Heft 039). o.O., (Bonn), 1979.

Pfeiffer, B. und G. Weimann: Geometrische Grundlagen der Luftbildinterpretation. Einfachverfahren der Luftbilddauswertung. Karlsruhe, 2. neubearb. Aufl., 1991.

Redecker, A. und J. Dodt: GIS-Einsatz bei der einzelfallbezogenen Erfassung von Altlastverdachtsflächen. (= Kartographische Schriften. Geovisualisierung in der Humangeographie. Nutzung kartengestützter Informationssysteme in Wissenschaft und Praxis, 13). Bonn 2007, S. 31-53.

Redecker, A.: Verfahren der digitalen Photogrammetrie bei der Auswertung historischer Luftbilder zur Erfassung von Altlastverdachtsflächen. Diss. Bochum, 2008.

Richards, J.A. und X. Jia: Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin/New York, 4. Aufl. 2006.

Richter, Ch. und B. Teichert: Einführung in die Digitale Bildverarbeitung. Dresden 2009.

Schenk, T.: Digital Photogrammetry. Volume I: Background, Fundamentals, Automatic Orientation Procedures. Laureville, OH, 1999.

Schiewe, J. und M. Ehlers: Semantisches Potenzial digitaler flugzeuggetragener Fernerkundungs-Sensoren. In: Photogrammetrie•Fernerkundung•Geoinformation, Heft 6/2004, S. 463 – 474.

Schwidefsky, K. und F. Ackermann: Photogrammetrie. Grundlagen, Verfahren, Anwendungen. Stuttgart, 7. Neubearb. u. erw. Aufl. 1976.

Stanley, R.M.: World War II Photo Intelligence. New York/London 1981.

Wargalla, H.: Farbkorrektur mit Photoshop und Scanprogrammen. 1. Aufl., Bonn 1999.

Warner, W.S. et al.: Small Format Aerial Photography. ASPRS, Bethesda/Md 1997.

Wolf, P. R. und B.A. Dewitt: Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. 3. Aufl., Boston 2000.

Landesamt für Natur, Umwelt
und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

