

DAV
wiss.
Hefte
4
D
8(34)

Wissenschaftliche Alpenvereinshefte
Heft 34

Gemeinsam herausgegeben
vom Deutschen und vom Österreichischen Alpenverein

**UNTERSUCHUNGEN
ZUR
GEOREFERENZIERUNG
VON
ALPENVEREINSKARTEN**

Zusammengestellt von
Kurt Brunner und Walter Welsch

MÜNCHEN 2001



Wissenschaftliche Alpenvereinshefte
Heft 34

Gemeinsam herausgegeben
vom Deutschen und vom Österreichischen Alpenverein

UNTERSUCHUNGEN
ZUR
GEOREFERENZIERUNG
VON
ALPENVEREINSKARTEN

Zusammengestellt von
Kurt Brunner und Walter Welsch

MÜNCHEN 2001

DAV wiss. Hefte

2002 B 590

4 D 8 (34)

Bezugsnachweis:

Haus des Alpinismus
Alpines Museum
Praterinsel 5
D-80538 München

Tel.: (089) 211224-0 . Fax: (089) 211224-40
online-Bestellung: <http://www.alpenverein.de/museum/kontakt.htm>

ISBN 3-928777-89-0

ISSN 0084-0912

Alle Rechte vorbehalten.
Nachdruck, auch auszugsweise,
nur mit Genehmigung
durch die Herausgeber.

Druck: EOS Druck und Verlag, St. Ottilien



2002 590

Vorwort

Seit ihrer Gründung bearbeiten der Deutsche Alpenverein und der Österreichische Alpenverein – bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs zusammengeschlossen zum Deutschen und Österreichischen Alpenverein – Karten alpiner und auch außeralpiner Bergregionen. Ab dem Beginn des 20. Jahrhunderts haben diese Karten zumeist den Maßstab 1:25 000 und eine Äquidistanz der Höhenlinien von 20 bzw. 25 m; diese Werte für Maßstab und Äquidistanz sind für die Orientierung im Gelände und als Grundlage für wissenschaftliche Arbeiten zwingend. Die topographische Aufnahme für diese so genannten Alpenvereinskarten geschah vor hundert Jahren mit den damals üblichen terrestrischen Meßverfahren; aber schon 1915 wurde die neu entwickelte terrestrische Photogrammetrie eingesetzt. Fünfzig Jahre später erfolgten die Neubearbeitungen auf der Grundlage der Luftbildphotogrammetrie.

Die topographischen Aufnahmeverfahren beruhen auf unterschiedlichen geodätischen Grundlagen; für die Kartennutzung mit Bussole und Höhenmesser ist dies völlig belanglos. Erst die heutige Nutzung der satellitengestützten Orientierung mit Hilfe des GPS-Systems, die blattschnittfreie Bereitstellung von Rasterdaten und die Ableitung von Daten für Geoinformationssysteme verlangen einheitliche geodätische Grundlagen: die Georeferenzierung der Alpenvereinskarten wird zu einem dringenden Erfordernis.

Die Aufsätze dieses Heftes beschäftigen sich mit der Frage, wie die Georeferenzierung durchgeführt werden kann. Grundsätzliches Hilfsmittel sind Transformationen, mit deren Hilfe kartensichere Punkte der Alpenvereinskarten in das heute übliche System der UTM-Koordinaten übergeführt werden können. Gewissermaßen als Nebenprodukt erhält man Aussagen über die Genauigkeit der Alpenvereinskarten und damit über die Frage, ob diese topographischen Karten der alpinen Regionen als Grundlage für die satellitengestützte Orientierung geeignet sind. Um das Ergebnis vorwegzunehmen: Sie sind es!

Im Anhang finden sich ein Glossar und eine Übersicht der Alpenvereinskarten. Die im Glossar erläuterten Begriffe sind in den Aufsätzen *kursiv* gesetzt.

Kurt Brunner

Walter Welsch

Inhalt

Vorwort

BRUNNER, Kurt

Topographisch-geodätische Aufnahmeverfahren der Alpenvereinskarten 9

PENZKOFER, Markus

Entzerrung und Georeferenzierung von Alpenvereinskarten 19

HELLER, Armin

Alpenvereinskarten als Grundlage für Geographische Informationssysteme 61

Anhang

Glossar 85

Übersicht Alpenvereinskarten 89

Anschriften 95

TOPOGRAPHISCH-GEODÄTISCHE AUFNAHMEMETHODEN DER ALPENVEREINSKARTEN

Kurt Brunner

1. Einführung

Sogleich nach der Gründung alpiner Vereine in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts hatten die meisten Vereine - außer dem britischen Alpine Club - auch kartographische Aktivitäten. Grund hierzu war, dass die amtlichen Karten des ausgehenden 19. Jahrhunderts den Anforderungen der Alpinisten nicht genügen konnten. Der Schweizer Alpenclub und der Club Alpin Français haben lediglich in der Anfangszeit Karten für die Westalpen herausgegeben; danach genügten die amtlichen Karten jener Länder den Ansprüchen der Bergsteiger.

Der ÖAV veröffentlichte 1861 seine erste Karte. Nachdem es in Österreich nach 1900 nur kurzzeitig ein unvollständiges amtliches Kartenwerk 1:25 000 gab, reichen die kartographischen Aktivitäten des Deutschen und des Österreichischen Alpenvereins bis in die heutige Zeit. Mit dieser inzwischen 140-jährigen Geschichte der Kartographie des Alpenvereins beschäftigten sich insbesondere FINSTERWALDER (1935 a) und ARNBERGER (1970), sowie in neuerer Zeit SCHIRMER (1996) und BRUNNER (2001).

Topographische Aufnahme und kartographische Bearbeitung waren in der Anfangszeit sehr unterschiedlich, was in einzelnen Zeitabschnitten zu Karten in verschiedenen Maßstäben mit stark unterschiedlicher kartographischer Gestaltung sowie geometrischer Genauigkeit führte. Hilfreiche Periodisierungen hierzu erstellten FINSTERWALDER (1935 a), AURADA (1962 und 1963) und ARNBERGER (1970). Diese Periodisierungen begründen sich zwar auf kartographischen Merkmalen, beinhalten aber auch topographische Kriterien.

Der Anfang der Alpenvereinskartographie (1861 – 1899) sei nur kurz angesprochen: in den ersten vierzig Jahren der Alpenvereinskartographie erschienen Karten in sehr verschiedenen Maßstäben und in hohem Maße unterschiedlicher Karten gestaltung. Sie basierten ausschließlich auf amtlichen topographischen und kartographischen Grundlagen. Diese Karten haben heute lediglich historischen Wert und werden deshalb nicht betrachtet.

Ab der Wende zum 20. Jahrhundert setzte der DÖAV auf eine eigenständige topographische Aufnahme für die Alpenvereinskarten. Seither wurden mehr als sechzig Karten aufgenommen und bearbeitet. Ein Großteil dieser Karten ist heute – natürlich mehrfach aktualisiert – im Programm der Alpenvereinskartographie. Als Aufnahmeverfahren fanden nacheinander Anwendung

- *Meßtischtachymetrie* (bis 1920)
- *terrestrische Stereophotogrammetrie* (ab 1912)
- *Luftbildphotogrammetrie* (ab 1967).

Eine Bewertung der einzelnen Kartenblätter ist nur unter Berücksichtigung der Entwicklung der topographischen Aufnahmeverfahren in den einzelnen Zeitabschnitten der Alpenvereinskartographie möglich; diese werden daher im Folgenden beschrieben.

2. Klassische Alpenvereinskartographie (1900–1967)

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts setzt die „Periode der klassischen Alpenvereinskartographie (1900–1967)“ ein (ARNBERGER, 1970; AURADA, 1962 und 1963). Die Karten haben nunmehr fast ausschließlich den Maßstab 1:25 000.

Die Karten dieses großen Zeitabschnitts sind geprägt durch eigene terrestrische topographische Aufnahmen des Alpenvereins, die sich auf amtliche geodätische Grundlagen stützten. Als topographisches Verfahren kommt zunächst die klassische *Messtischtachymetrie* zum Einsatz. Die Aufnahme mit dem Messtisch war zu Beginn des 20. Jahrhunderts topographisches Standardverfahren; ihr Nachteil sind die umfangreiche Geländearbeit und die punktweise Geländeaufnahme. Ab 1912 kamen die ersten Verfahren der *terrestrischen Photogrammetrie* zur Anwendung und ab 1922 geschah die Kartenaufnahme über vierzig Jahre lang ausschließlich auf terrestrisch-stereophotogrammetrischem Wege.

2.1 Die Karten von AEGERTER und ROHN (1900–1936)

2.1.1 Erste Phase: Messtischtachymetrie

Die Kartenaufnahme dieser Periode besorgte – mit wenigen Ausnahmen – der Topograph Leo AEGERTER mittels Messtischtachymetrie; die Steingravur erledigte ab 1904 der Kartolithograph Hans ROHN.

Die topographische Aufnahme mittels Messtischtachymetrie erfolgte angesichts des Geländes durch Strecken-, Richtungs- und Höhenmessungen mit der Kippregel; hierzu musste ein Messgehilfe jeden aufzunehmenden Geländepunkt mit einer Messlatte betreten. Es versteht sich von selbst, dass dies im steilen Fels nicht möglich war; hier konnten nur einzelne markante Punkte durch Vorwärts-einschneiden von zwei Standpunkten aus bestimmt werden. Die Felszeichnung der Karte konnte sich deshalb nur auf sehr wenige gemessene Punkte stützen. Den Vorgang der seinerzeitigen Geländearbeiten beschreibt AEGERTER (1908) am Beispiel der Aufnahme der „Karte der Brentagruppe“. Auf diese Weise entstehen rund ein Dutzend Karten; von den so aufgenommenen Karten sind nur noch wenige im Programm der Alpenvereinskartographie.

Die „Karte der Brentagruppe“ erhielt 1988 eine völlige Neubearbeitung unter Erhalt der exzellenten Felszeichnung (NEUGEBAUER, 1987).

2.1.2 Zweite Phase: Photogrammetisches Verfahren

Bereits 1912 begann mit einer zweiten Phase der „klassischen Epoche der Alpenvereinskartographie“ durch den Einsatz photogrammetrischer Verfahren eine tiefgreifende Neuerung. Ab 1911 stand mit dem nach Angaben von Eduard

von OREL gebauten „Stereograph“ der Fa. Carl ZEISS ein analoges Auswerte-gerät für terrestrisch-stereophotogrammetrische Aufnahmen zur Verfügung. Die nun mögliche linienhafte Kartierung aus einem Stereomodell stellte eine außerdurchschnittliche Leistungssteigerung der Topographie dar; gravierender Fortschritt war die direkte Erzeugung von Höhenlinien mit einer hohen geometrischen und geomorphologischen Genauigkeit.

Weiterhin mußte des Gelände nicht mehr vollständig begangen werden; von geeigneten Punkten wurden mittels einer photogrammetrischen Messkamera („Phototheodolit“) Aufnahmen gefertigt. Auswertung und Ausarbeitung erfolgte in häuslicher Arbeit. Dies veranlaßte Eduard BRÜCKNER, den damaligen Sachwalter für Kartographie des DÖAV, die terrestrische Photogrammetrie für die Aufnahme des Dachsteinstocks einzusetzen. 1915 erschien mit der „Karte der Dachsteingruppe“ die erste photogrammetrisch aufgenommene Alpenvereinskarte. Ab 1922 erfolgte die Kartenaufnahme für die Alpenvereinskartographie auf Anregung von Richard FINSTERWALDER ausschließlich durch die terrestrische Stereophotogrammetrie. Die photogrammetrischen und geodätischen Arbeiten sind in FINSTERWALDER (1935 b und 1939) umfangreich beschrieben.

Geodätische Basis waren eigene Triangulationen auf der Grundlage von Festpunkten der seinerzeitigen Landesaufnahmen, wie jener des Militärgeographischen Instituts (bis 1918), der Katastervermessung und der Vermessung der neuen Staatsgrenze Italien-Österreich. Diese Landesaufnahmen hatten unterschiedliche Grundlagen; Orientierung und Genauigkeit dieser Grundlagen läßt sich heute praktisch nicht mehr direkt feststellen.

2.2 Die Karten von SCHNEIDER und EBSTER (1936 – 1967)

2.2.1 Terrestrische Stereophotogrammetrie

Diese Periode ist geprägt durch die kartographische Anforderung, dass in der Felszeichnung grundsätzlich auch Höhenlinien dargestellt werden sollen. Dieses Verlangen wurde durch den Kartolithographen Fritz EBSTER mit einer Felszeichnung realisiert, die aus einer Scharung feiner Schraffen bestand (EBSTER, 1935). Photogrammetrische Methoden ermöglichen prinzipiell Höhenlinien auch im steilen, unzugänglichen Fels; diese Möglichkeiten wurden aber vorher praktisch nicht genutzt.

Eine erste Realisierung dieser Kartographik der EBSTER-Periode findet sich im „Kartenwerk der Stubaier und Ötztauer Alpen“. Die terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen und Auswertungen dieser Periode besorgte Erwin SCHNEIDER bis in die Zeit des Zweiten Weltkriegs; die Auswertungen erfolgten am Stereoautograph des Geodätischen Instituts in Hannover und später in Berlin.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden die Arbeiten vom ÖAV weitergeführt; die Alpenvereinskartographie hatte inzwischen eine feste Arbeitsstelle in Innsbruck.

2.2.2 Erster Einsatz der Luftbildphotogrammetrie

Mit der Karte „Totes Gebirge“, für die 1967 erstmals die *Luftbildphotogrammetrie* topographische Grundlage für eine Neuherstellung war (FINSTERWALDER, 1966 und 1967), ging die Ära von Fritz EBSTER und Erwin SCHNEIDER zu Ende. Luftbilder wurden bisher – wenn überhaupt – zur Kartenaktualisierung herangezogen, jedoch ohne messtechnische Auswertung.

2.3 Bewertung der terrestrischen Photogrammetrie

Die frühe Einführung der terrestrischen Photogrammetrie stellte einen bemerkenswerten Fortschritt bei der Aufnahme der Alpenvereinskarten dar. Die terrestrische Photogrammetrie war ja gerade im Hochgebirge ein besonders geeignetes Verfahren; in ihrer Nutzung für die Alpenvereinskartographie wurde sie umfangreich perfektioniert. Bei der heutigen Nutzung von Karten, die auf terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen basieren, muss man sich aber auch der Nachteile des Verfahrens bewusst sein. Von Nachteil ist zweifellos, dass hier die Genauigkeit der Auswertung mit der Entfernung vom Aufnahmeort abnimmt. Hinzu kommt, dass für die gesamte Karte eine Zusammensetzung aus einer Reihe von Einzelauswertungen notwendig war. Dies kann aufgrund der so unterschiedlichen Lage- und Höhengenauigkeiten zu einer Inhomogenität im Kartenblatt führen.

3. Moderne Alpenvereinskartographie ab 1966

Diese Periode ist gekennzeichnet durch die Neuherstellung von Karten ausschließlich auf der Grundlage der Luftbildphotogrammetrie und durch die „geometrisch gebundene Felsdarstellung“ von Leonhard BRANDSTÄTTER.

3.1 Die Karten von BRANDSTÄTTER (1966 – 1979)

Die Periode fällt zusammen mit der Einrichtung einer Kartographie des DAV in München; die Alpenvereinskartographie hat somit neben Innsbruck ein zweites Standbein (FINSTERWALDER, 1994; BRUNNER, 2001). Als erstes Projekt wurde 1966 mit der Bearbeitung von Karten der Berchtesgadener Alpen begonnen. 1969 erschien das Blatt „Steinernes Meer“ (BRANDSTÄTTER, 1969 und 1974), 1972 folgte das Blatt „Hochkönig-Hagengebirge“ (FINSTERWALDER, 1972 a und b), weitere Neubearbeitungen von Leonhard BRANDSTÄTTER erschienen bis 1979. Die Karten beruhten auf Bildflügen des österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen. Die geodätischen Grundlagen, die Passpunktbestimmung und photogrammetrischen Auswertungen wurden vom Institut für Photogrammetrie

und Kartographie der Technischen Universität München erbracht, z. T. konnten auch vorhandene Auswertungen 1 : 10 000 aus Bayern und Österreich genutzt werden. Ergebnis waren zunächst photogrammetrische Auswertungen im Maßstab 1 : 10 000, welche dann von Leonhard BRANDSTÄTTER kartographisch bearbeitet wurden.

Wesentliches Merkmal der kartographischen Gestaltung der Karten dieser Periode ist die Darstellung von Fels, die hier auf der vollständigen Darstellung von Höhenlinien bis zur Steilgrenze besteht. Im Steilraum darüber wird ein Schrungersatz in Form von Schraffen genutzt. Im flachen Fels, so auch im Karst, wird eine Struktur- und Gefügezeichnung verwendet (BRANDSTÄTTER, 1969 und 1974). Mit der Karte „Ankogel-Hochalm“ endeten die Tätigkeiten von Leonhard BRANDSTÄTTER.

1973 erschien das Blatt „Rofan“ und bis 1990 folgten weitere Bearbeitungen von Alpenvereinskarten auf der Grundlage der Luftbildphotogrammetrie. In den siebziger Jahren erfolgte die Einarbeitung von neuen Gletscherständen in einige durch terrestrische Photogrammetrie entstandene Alpenvereinskarten mittels Luftbildphotogrammetrie.

3.2 Bewertung der Luftbildphotogrammetrie

Die Luftbildphotogrammetrie ist ein aufwendigeres Vorhaben: Bildflüge müssen geplant und durchgeführt werden. Bezuglich der Genauigkeit liefert sie gegenüber der terrestrischen Photogrammetrie homogenere Ergebnisse, da die Aufnahmefernungen auch im Hochgebirge weitgehend gleich groß bleiben. Eine Aerotriangulation vor der Auswertung sorgt weiterhin für homogene Geometrie und Genauigkeit. Aus diesen Gründen ist sie der terrestrischen Photogrammetrie überlegen.

Weitere Neuaufnahmen von Alpenvereinskarten auf der Grundlage der Luftbildphotogrammetrie sind aus wirtschaftlichen Gründen derzeitig nicht zu erwarten. Hauptaufgabe der Alpenvereinskartographie ist gegenwärtig die Aktualisierung und die Georeferenzierung ihrer Karten.

4. Aktualisierung der Alpenvereinskarten

Die Alpenvereinskartographie hält gegenwärtig knapp fünfzig Karten des Ostalpenraums vor. Die meisten dieser Karten im Maßstab 1 : 25 000 entstanden seit Beginn des 20. Jahrhunderts durch den Alpenverein; einige der Karten sind Lizenzausgaben amtlicher österreichischer Karten in Sonderschnitten, zumeist im Maßstab 1 : 50 000 (siehe Übersicht im Anhang dieses Heftes). Daneben bearbeitet

die Alpenvereinskartographie etwa zwanzig Karten außeralpiner Hochgebirge in Maßstäben von 1:25 000 bis 1:100 000 (SCHIRMER, 1996).

Wichtigste Arbeit der Alpenvereinskartographie ist gegenwärtig die Aktualisierung ihrer Karten. Diese Aufgabe ergibt sich aus den Veränderungen in der alpinen Landschaft. Dies sind im anthropogenen Bereich umfangreiche Erweiterungen von Siedlungen und der Bau von Straßen und Wegen. Im natürlichen Bereich verlangt der Rückzug der Gletscher Aktualisierungen des Karteninhalts. Die Fortführung der Karten erfolgt im Durchschnitt alle acht Jahre; diese Arbeit haben sich die Kartographiestellen in Innsbruck und München aufgeteilt.

4.1 Kartographische Arbeiten

Die Einarbeitung der Aktualisierungen in die Kartenoriginale erfolgte bis 1993 in traditioneller Technik durch Zeichnung mit Tusche und Montage von Schriften. Seither geschieht die Aktualisierung mit digitaler Kartentechnik (BRUNNER, 2001; FISCHER, 2001). Hierzu wurden die Kartographiestellen in Innsbruck und München mit digitalen Arbeitsplätzen und geeigneter Software ausgestattet. Zur digitalen Bearbeitung ist es zunächst erforderlich, von den Kartenoriginalen Rasterdateien herzustellen; dies erfolgt durch Scannen der Folien. Nach der fertigen Einarbeitung der Veränderungen und ggf. erforderlichen Entzerrungen werden die fertigen Dateien auf CD-ROM kopiert; von diesen können anschließend die Druckfilme belichtet werden, mit denen der Auflagendruck der aktualisierten Karte erfolgt.

Für ihre Arbeit benötigen die Kartographen Daten der Veränderungen der Landschaft; ihre topographische Erfassung geschieht vorher zu geeigneter Jahreszeit.

4.2 Topographische Erfassung

Die Erfassung dieser Veränderungen erfolgt vielfältig und in unterschiedlicher Weise, so auch durch Nutzung vorhandener Luftbilder und amtlicher Karten. Große Bedeutung wird der Geländebegehung geschenkt, bei welcher gegenwärtig mit einfachen Mitteln Veränderungen der Landschaft erfasst und in einer Entwurfszeichnung zusammengestellt werden. Diese topographische Geländearbeit führen die Alpenvereinskartographen selbst aus. Von der Entwurfszeichnung wird durch Scannen eine Rasterdatei für den digitalen Arbeitsplatz der Kartographen erstellt.

Gegenwärtig laufen Untersuchungen, die Veränderungen mit leichten GPS-Geräten in Verbindung mit einfachen Tachymeter-Instrumenten bereits im Gelände digital zu erfassen und zu speichern. Die so gewonnenen Vektordaten sollen dabei noch im Gelände auf der Grundlage eines Rasterbildes der Karte überprüft

werden und stehen danach für die digitale Aktualisierung der Kartenblätter zu Verfügung.

Nachteil bleibt, dass mit dieser Vorgehensweise vorwiegend punkt- und linienhafte Objekte, wie Wege und Einzelobjekte erfassbar sind, während flächenhafte Oberflächenerscheinungen nur eingeschränkt aufgenommen werden können. Dies ist gerade bei der Aktualisierung der Gletscherstände problematisch. Durch den starken Rückzug der Gletscher ergeben sich einerseits bedeutsame Veränderungen des Gletscherkörpers, andererseits wird umfangreich Gelände eisfrei. Günstig wäre hier zur Erfassung dieser Veränderungen natürlich die Luftbildphotogrammetrie, aber eine eigenständige Befliegung zur Kartenaktualisierung ist wirtschaftlich nicht vertretbar.

Möglicherweise lässt sich die flächenhafte Aufnahme von Gletscheroberfläche und eisfrei gewordenem Umland in absehbarer Zeit vorteilhaft durch terrestrische Laserscanner lösen.

5. Einheitliche Georeferenzierung und geometrische Genauigkeit

Wie mehrfach angesprochen, beruhen die Alpenvereinskarten auf verschiedenen topographischen Aufnahmemethoden mit unterschiedlichen geodätischen Grundlagen und somit abweichenden *Bezugssystemen*. Deshalb wurde bis vor wenigen Jahren konsequenterweise auf den Eintrag eines geodätisch orientierten Gitters verzichtet; lediglich die geographische Länge und Breite einer nicht ausgewiesenen *Georeferenzierung* waren angerissen.

5.1 Georeferenzierung

Dies war kein Nachteil solange Bergsteiger sich mit Bussole, Höhenmesser und Schrittmaß orientierten. Erst die Nutzung von GPS-Handgeräten zur Orientierung im Hochgebirge gemeinsam mit Karten verlangte insbesondere nach der Abschaltung der *Selective Availability* nach einer *Georeferenzierung* mit einem einheitlichen expliziten Raumbezug. Gegenwärtig wird deshalb im Rahmen der Kartenfortführung eine Georeferenzierung der einzelnen Kartenblätter ausgeführt. Die Kartenblätter erhalten hierzu ein *UTM-Gitter* auf der Grundlage von *WGS 84* (World Geodetic System 1984).

Eine einheitliche Georeferenzierung der Alpenvereinskarten ist auch für eine blattschnittfreie Vorhaltung der Karteninhalte als Rasterdaten zumindest von einzelnen Gebirgsstöcken erforderlich. Dies ist unter anderem für eine geplante Version der Alpenvereinskarten auf CD-ROM notwendig.

5.2 Geometrische Genauigkeit und Homogenität

Zu prüfen ist hierzu allerdings, in welcher Genauigkeit diese Georeferenzierung möglich ist. Die Tatsache der mehrfach angesprochenen unterschiedlichen topographischen Aufnahmen, die auf verschiedenartigen geodätischen Grundlagen basieren, ließ aber zunächst eine sehr inhomogene Kartengeometrie mit unterschiedlichen Lagefehlern für einen Großteil der Kartenblätter erwarten.

Eine erste Genauigkeitsanalyse ergab jedoch eine erstaunlich gute geometrische Genauigkeit, sodass für eine Mehrheit der Alpenvereinskarten Lagefehler unter einem Millimeter im Kartenmaß angenommen werden können (PENZKOFER, u. a., 2000). Diese Genauigkeitsanalyse stellt Markus PENZKOFER in einem Beitrag in diesem Heft vor. Unabhängig von dieser Untersuchung erfolgte in Innsbruck eine weitere Genauigkeitsanalyse durch Armin HELLER. Diese Untersuchung ist gleichfalls Bestandteil dieses Heftes.

6. Literatur

- AEGERTER, L. (1908): Begleitworte zur Karte der Brentagruppe. Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, Band 24, S. 80 - 91.
- ARNBERGER, E. (1970): Die Kartographie im Alpenverein. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, Heft 22, Innsbruck, 253 S.
- AURADA, F. (1962): 100 Jahre Alpenvereinskartographie. Die Alpenvereinskarte und ihre Entwicklung. Arbeiten der Gruppe für Natur- und Hochgebirgskunde und alpine Karstforschung. Sektion Edelweiß des Österreichischen Alpenvereins, Heft 6. Wien. 23 S.
- AURADA, F. (1963): Entwicklungsphasen der Alpenvereinskartographie. Kartographische Nachrichten. 13. Jhrg., H. 6 . S. 158 - 166.
- BRANDSTÄTTER, L. (1969): Geleitworte des Kartographen zur Alpenvereinskarte „Steinernes Meer“. Jahrbuch des Deutschen Alpenvereins, Bd. 94, München, S. 97 - 109.
- BRANDSTÄTTER, L. (1974): Zur Problematik und Tradition der Alpenvereinskarten. Dargestellt am Beispiel der Hochkönigsgruppe. Internationales Jahrbuch für Kartographie, Bd. 14, Bonn, S. 47 - 65.
- BRUNNER, K. (2001): Die Kartographie des Deutschen Alpenvereins. Kartographische Nachrichten. 51. Jhrg. H. 1. S. 17 - 22.
- BRUNNER, K und WELSCH, W. M. (Hrsg.) (1999): Hochgebirgs- und Gletscherforschung. Zum 100. Geburtstag von Richard Finsterwalder. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen. Universität der Bundeswehr München. H. 62, Neubiberg, 114 S.

- EBSTER, F. (1935): Zur Felszeichnung und topographischen Geländedarstellung der neuen Alpenvereinskartographie. In: FINSTERWALDER, Ri. (Hrsg.): Die Alpenvereinskartographie und die ihr dienenden Methoden. Sammlung Wichmann, Bd. 3. Berlin, S. 46 - 53.
- FINSTERWALDER, Ri. (1935 a): Die Entwicklung der Alpenvereinskartographie. In: FINSTERWALDER, Ri. (Hrsg.): Die Alpenvereinskartographie und die ihr dienenden Methoden. Sammlung Wichmann, Bd. 3. Berlin, S. 9 - 16.
- FINSTERWALDER, Ri. (1935 b): Die heutige Technik der Alpenvereinskartographie. In: FINSTERWALDER, Ri. (Hrsg.): Die Alpenvereinskartographie und die ihr dienenden Methoden. Sammlung Wichmann, Bd. 3. Berlin, S. 19 - 64.
- FINSTERWALDER, Ri. (1939): Photogrammetrie. Berlin, 237 S.
- FINSTERWALDER, Rü. (1966): Erfahrungen mit Überweitwinkelaunahmen im Hochgebirge. Zeitschrift für Vermessungskunde. 91. Jhrg., H. 7, S. 229 - 242.
- FINSTERWALDER, Rü. (1967): Zur Karte des Toten Gebirges. Jahrbuch des Deutschen Alpenvereins, S. 33 - 40.
- FINSTERWALDER, Rü. (1972 a): Zur Aufnahme der Alpenvereinskarte „Hochkönig-Hagengebirge“. Jahrbuch des Deutschen Alpenvereins, Bd. 97, München, S. 1 - 5.
- FINSTERWALDER, Rü. (1972 b): Zur Aufnahme der Alpenvereinskarte „Hochkönig-Hagengebirge“. Ergänzungsheft zum Alpenvereinsjahrbuch. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, Bd. 23. München, S. 5 - 10.
- FINSTERWALDER, Rü. (1980): Die Fortführung des Alpenvereinskartenwerks. Alpenvereinsjahrbuch, Bd. 105, S. 5 - 12.
- FINSTERWALDER, Rü. (1994): Unabgerissene Tradition. 25 Jahre Kartographie beim Deutschen Alpenverein. In: LANDES, E. und M. (Hrsg.): 125 Jahre Deutscher Alpenverein, München, S. 83 - 91.
- FISCHER, J. (2001): Digitale Aktualisierung der Alpenvereinskarten. Kartographische Nachrichten. 51. Jhrg., H. 1. S. 22 - 26.
- NEUGEBAUER, G. (Hrsg.) (1987): Brenta-Monographie. Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Hochgebirgskartographie. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen. Universität der Bundeswehr München. H. 24, Neubiberg, 183 S.
- PENZKOFER, M., BRUNNER, K., FISCHER, J. und REINHARDT, W. (2000): Untersuchungen zur Genauigkeitsanalyse von Alpenvereinskarten. Zeitschrift für Vermessungswesen. 126. Jhrg., H. 1, S. 5 - 10.
- SCHIRMER, H. (1996): Die Kartographie des Alpenvereins. In: KRETSCHMER, I. und KRIZ, K. (Hrsg.): Kartographie in Österreich '96. Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie. Bd. 9. Wien, S. 88 - 95.

ENTZERRUNG UND GEOREFERENZIERUNG VON ALPENVEREINSKARTEN

Markus Penzkofer

1. Einleitung

1.1 Ausgangspunkt

Seit hundert Jahren stellen der Deutsche und der Österreichische Alpenverein Karten zumeist im Maßstab 1:25 000 her. Ein großer Teil dieser Karten ist heute noch im Programm der Alpenvereinskartographie.

Seit einigen Jahren erfolgte durch den Deutschen und den Österreichischen Alpenverein, nicht zuletzt aus Kostengründen, keine weitere Kartenneuherstellung im alpinen Bereich. Hauptaufgabe ist gegenwärtig die Aktualisierung der Alpenvereinskarten. Da es Bestreben der Alpenvereinskartographie (ARNBERGER, 1970; FINSTERWALDER, 1994; SCHIRMER, 1996; BRUNNER, 2001) ist, den inhaltlich und gestalterisch wertvollen Kartenbestand stets auf dem aktuellen Stand zu halten, sollen die Alpenvereinskarten zukünftig auch ein international gebräuchliches Koordinatengitter enthalten. Dafür bietet sich das *UTM-Gitter* an, das bei den handelsüblichen GPS-Handgeräten zu den Standardkoordinatensystemen gehört. Die *Georeferenz* bezüglich eines internationalen Bezugssystems ist jedoch bei den Alpenvereinskarten unbekannt. Zudem hat sich bei den Fortführungsarbeiten gezeigt, dass die Geometrie mancher Alpenvereinskarten nicht in allen Punkten mit derjenigen amtlicher Karten übereinstimmt. Mit den heutigen GPS-Handgeräten unter Nutzung des Satellitenpositionierungsdienstes *SAPOS* (SAPOS; HANKE-MEIER, 1998) bzw. bei der gegenwärtigen Abschaltung der *Selective Availability* des GP-Systems ist eine absolute Positionierung mit hoher Genauigkeit möglich und es wären Lagegenauigkeiten auch für den Wanderer nachweisbar. Dies gab Anlass, die geometrische Genauigkeit der Alpenvereinskarten zu überprüfen und das Kartenwerk in einem internationalen Bezugssystem zu georeferenzieren.

1.2 Fragestellungen

Wie eben dargelegt fehlt den Alpenvereinskarten ein expliziter Raumbezug. Die Karten wurden in ihrer bisherigen Ausgabe lediglich mit einem Such- und Meldegitter versehen. Dieses Gitter ist ohne jeglichen Bezug zu einem geodätischen Bezugssystem. Des Weiteren sind zwar am Kartenrahmen *geographische Koordinaten* angerissen, eine Georeferenz ist dadurch jedoch nicht festgelegt, da nicht bekannt ist, auf welchen Referenzkörper (Kugel, *Ellipsoid*) sich diese beziehen. Um statt des Such- und Meldegitters das UTM-Gitter bezüglich des internationalen Bezugssystems *WGS 84* in die Karte einzufügen, ist die Frage der *Georeferenzierung* zu klären.

Für eine absolute Positionsbestimmung ist neben der Georeferenz die geometrische Genauigkeit einer Karte von Bedeutung. Da zum einen bei der Kartenfortführung bereits Ungenauigkeiten aufgefallen waren, zum anderen den meisten Alpenvereinskarten terrestrische Aufnahmeverfahren zugrunde liegen, war eine

Bestimmung von Punktgenauigkeiten ebenso Gegenstand der Untersuchungen. Bei terrestrischen Aufnahmeverfahren wie zum Beispiel der *Messtischaufnahme* und der *terrestrischen Stereophotogrammetrie* handelt es sich um Verfahren, bei welchen die Erfassung des Geländes über zahlreiche kleine, separierte Aufnahmegebiete erfolgt. Daher besteht die Möglichkeit, dass Teilgebiete zwar in sich homogen sind, jedoch relativ zueinander Spannungen aufweisen können. Die Abschätzung von relativen Genauigkeiten sowie die Ermittlung homogener Bereiche war daher Ausgangspunkt der Untersuchungen. Beim Erkennen homogener Bereiche könnten Aufzeichnungen über die Standpunkte während der topographischen Aufnahme hilfreich sein. Leider konnten keine derartigen Aufzeichnungen ausfindig gemacht werden.

Für den Fall, dass in Alpenvereinskarten Spannungen und Verzerrungen enthalten sind, sollte untersucht werden, ob und auf welchem Wege diese weitestgehend beseitigt werden können. Dabei mussten die Auswirkungen einer digitalen geometrischen Manipulation auf den Karteninhalt berücksichtigt werden. Insbesondere Schriften oder die aus feinen Linien in geringem Abstand bestehenden Felszeichnungen könnten in ihrem Aussehen und ihrer Qualität beeinträchtigt werden. Augenmerk wurde auch darauf gelegt, den Nachbearbeitungsaufwand gering zu halten.

Die oben aufgeworfenen Fragestellungen und sich daraus ergebende Folgefragen seien nochmals kurz skizziert:

- Treten in den Alpenvereinskarten homogene Teilbereiche auf, die sich durch eine gegenseitige Verschiebung oder Verdrehung auszeichnen?
- Wie gut ist die geometrische Genauigkeit der Alpenvereinskarten im Ganzen?
- Reicht diese Genauigkeit für eine unveränderte Weiterverwendung der Karten aus oder müssen an den Karten geometrische Verbesserungen irgendwelcher Art vorgenommen werden?
- Wie würden sich geometrische Verbesserungen in Form einer lokalen *Entzerrung* mit der zur Verfügung stehenden Software auf den Karteninhalt auswirken?
- Ist eine zufriedenstellende Georeferenzierung des Kartenmaterials möglich?

2. Datenbestände der Alpenvereinskartographie

Die Alpenvereinskartographie kann mittlerweile auf eine über 125-jährige Tradition zurückblicken (BRUNNER, 2001). Während dieser Zeit sind etwa fünfzig Karten im alpinen Raum und etliche Expeditionskarten in anderen Hochgebirgen entstanden. Der Großteil der bis heute fortgeführten Karten des Alpenraumes wurde zwischen 1900 und 1965 unter Verwendung terrestrischer Aufnahmeverfahren

erstellt. Gerade auf terrestrischen Aufnahmeverfahren basierende Alpenvereinskarten zeigen nach den Erfahrungen der Alpenvereinskartographen geometrische Ungenauigkeiten. Da weniger als zehn der Alpenvereinskarten auf *Messtisch-tachymetrie* und zwei Dutzend auf *terrestrisch-photogrammetrischer Aufnahme* beruhen, wurden eine Karte des ersten Aufnahmetyps und zwei Karten des letzten Aufnahmetyps für die Untersuchungen ausgewählt. Für die Untersuchungen lagen die Alpenvereinskarten in digitaler Form vor.

2.1 Aufnahmeverfahren der Alpenvereinskartographie

Die sogenannte klassische Alpenvereinskartographie begann um die Jahrhundertwende und dauerte bis kurz vor Ausbruch des Zweiten Weltkrieges an. Dieser Epoche entstammen zahlreiche Alpenvereinskarten, die noch heute fortgeführt und veröffentlicht werden. In diesem Zeitraum vollzog sich auch ein Wandel in den Aufnahmeverfahren. Ab Mitte der 1920er Jahre löste die terrestrische Stereo-photogrammetrie (FINSTERWALDER, 1968) die bis dahin fast ausschließlich verwendete Messtischaufnahme weitgehend ab. Auch wurde bereits stellenweise die *Luftbildphotogrammetrie* erfolgreich eingesetzt. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde zunächst die terrestrisch-photogrammetrische Aufnahmemethode beibehalten. Ab Mitte der 1960er Jahre kam ausschließlich die *aerophotogrammetrische Aufnahme* bei der Kartenneuherstellung zum Einsatz. Seit 1973 liegt der Schwerpunkt der Alpenvereinskartographie in der Kartenfortführung.

2.2 Untersuchungsgebiete in den Alpenvereinskarten

Für die Untersuchungen wurden aus den etwa fünfzig Alpenvereinskarten des Alpenraumes drei Karten ausgewählt. Zwei dieser Karten beruhen wie beinahe die Hälfte der Alpenvereinskarten auf terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen. Die dritte ausgewählte Karte entstand zu einem früheren Zeitpunkt größtenteils durch Messtischaufnahme, einem Verfahren, das bis zum Aufkommen der *Photogrammetrie* in der topographischen Landesaufnahme üblich war.

Für jede der untersuchten Karten im Maßstab 1:25 000 wurde ein Untersuchungsgebiet definiert (vgl. Abb. 1). In der Karte „Karwendelgebirge–West“ (*terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme*, Erstausgabe 1933) deckt der Ausschnitt das nördlich von Scharnitz gelegene österreichische Gebiet (ca. 65 km²) sowie das gesamte in der Karte dargestellte bayerische Gebiet (ca. 70 km²) ab. Die Landschaft dieses Untersuchungsgebietes kann grob in drei Haupterscheinungsformen geteilt werden: in die Tallagen der Isar und ihrer Zuflüsse, in die bewaldeten, mäßig steilen Berg Rücken um Mittenwald und Scharnitz und in die steilen Felsregionen des Karwendelmassivs.

Für die Karte „Zillertaler Alpen–West“ (*terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme*, Erstausgabe 1930) wurden das österreichische Gebiet südlich der Karten-

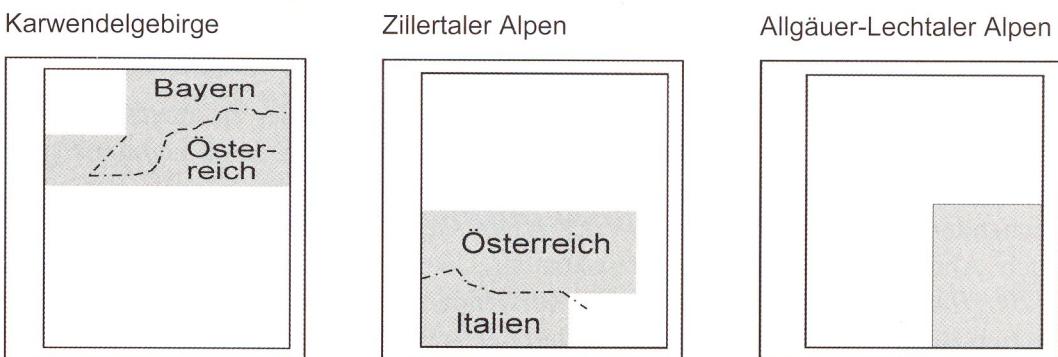


Abb. 1: Untersuchungsgebiete in den drei untersuchten Alpenvereinskarten

mitte (ca. 85 km^2) und das italienische Gebiet westlich des Hochfeilers (ca. 40 km^2) bearbeitet. Dieser Kartenausschnitt ist geprägt durch die bewuchslosen, teils vergletscherten Hochlagen der westlichen Zillertaler Alpen (BIERSACK, 1934).

Das Untersuchungsgebiet der Karte „Allgäuer-Lechtaler Alpen–West“ (*Mess-tischaufnahme*, Erstausgabe 1912) liegt in der Südostecke des Kartenblatts (ca. 50 km^2). Es enthält das Lechtal um Holzgau und die zur Felsregion um den Krottenkopf ansteigende Formation.

2.3 Rasterdaten der Alpenvereinskarten

Die Alpenvereinskarten lagen für die Untersuchungen in digitaler Form vor, da die Fortführung der Karten durch die Kartographen des Deutschen und des Österreichischen Alpenvereins seit 1996 mittels digitaler Kartentechnik erfolgt. Verwendet wird hierbei das *CAD-System MicroStation* der Firma Bentley in Verbindung mit der Software I/RAS B und I/RAS C zur Manipulation von Rasterdaten der Firma Intergraph (FISCHER, 2001).

Die *Rasterdaten* der Alpenvereinskarten werden durch *Scannen* der Druckoriginale erhalten. Für jeden Farbauszug liegt dann eine Rasterdatei in einem software-spezifischen Datenformat vor. Die Auflösung beträgt 1200 *dpi*. Um eine konsistente Bearbeitung und Manipulation der Rasterdaten zu gewährleisten, muss neben einer einheitlichen Pixelgröße auch darauf geachtet werden, dass die Pixel der verschiedenen Farbauszüge deckungsgleich aufeinander liegen. Damit die Rasterdaten nach der digitalen Fortführung wieder in eine analoge Karte mit den entsprechenden Maßen umgesetzt werden können, wird diesen als Maßeinheit die Dimension der Papierkarte zugrunde gelegt. Bei der Messung von Punkten in den Rasterdaten erhält man Koordinaten in dieser Maßeinheit, in den vorliegenden Daten Zentimeter in der Karte.

3. Referenzdatenbestände

Zur Bestimmung der Genauigkeit und der *Georeferenz* der zu untersuchenden Alpenvereinskarten wurden möglichst aktuelle amtliche Geodaten herangezogen. Diese werden im Folgenden als **Referenzdaten** bezeichnet. Für die zu untersuchenden bayerischen und österreichischen Gebiete wurden als Referenzdaten nach Abwägung von Beschaffungskosten, Detaillierungsgrad und Genauigkeit *photogrammetrische Auswertungen* verwendet. Für das italienische Untersuchungsgebiet im Kartenblatt der Zillertaler Alpen standen keine photogrammetrischen Auswertungen als Referenzdaten zur Verfügung. Als Alternative wurden die italienischen Karten 1:25 000 verwendet.

Die Referenzdaten liegen je nach Herkunftsland und Alter in unterschiedlichen Koordinatensystemen, Maßstäben und Blattschnitten vor.

3.1 Referenzdaten des Bayerischen Landesvermessungsamtes

Für die bayerischen Anteile der Alpenvereinskarten wurden Luftbildauswertungen des Bayerischen Landesvermessungsamtes im Maßstab 1:10 000 verwendet, die in den 1970er Jahren für die Herstellung der Topographischen Karte 1:25 000 (TK 25) erstellt wurden. Diese Auswertungen lagen als Zusammenkopie von Situation, Gewässer, Vegetation und Höheninformation auf Folie vor. Eine Einheit dieses Referenzdatenbestandes deckt ein Viertel eines TK 25-Blattes ab und orientiert sich nach dessen Blattschnitt. Die Georeferenz für eine dieser Folien ist durch die angerissenen Gitterpunkte des Blattschnitts der bayerischen Flurkarten und durch Festpunkte gegeben.

3.2 Referenzdaten des Österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV)

In den österreichischen Gebieten der untersuchten Alpenvereinskarten wurden als Referenzdaten Luftbildauswertungen des Österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen im Maßstab 1:10 000 verwendet. Diese auch als Manuskriptkarten bezeichneten Auswertungen stellen die in den 1960er Jahren erfasste Grundlage für die Österreichische Karte 1:50 000 dar. Deshalb weisen sie einen höheren *Generalisierungsgrad* auf. Sie standen in drei getrennten transparenten Folien zur Verfügung, welche die Bereiche „Situation mit Vegetationsgrenzen“, „Höhenschichten mit Gewässernetz“ sowie „Höhenkoten“ abdecken. Der Blattschnitt dieser Manuskriptkarten ist durch runde 1000-Meter-Werte im österreichischen *Gauß-Krüger-System* (System MGI) gegeben; eine Folie umfasst ein Gebiet von 3 auf 3 Kilometer. Dementsprechend ist auch die Georeferenz über

ein aufgezeichnetes 1-mal-1-Kilometer-Gitter des Systems MGI vorgegeben. Das *Geodätische Datum* ist durch den Punkt Hermannskogel bei Wien festgelegt, das Höhendatum ist der Pegel von Triest.

3.3 Referenzdaten des Istituto Geografico Militare

Für das untersuchte italienische Gebiet schienen Karten des Istituto Geografico Militare der am besten zugängliche und geeignete Datenbestand zu sein. Bei einem Maßstab von 1:25 000 besitzen diese Karten einen hohen Detaillierungsgrad. Die Auswertungen zur Erstellung der Karten stammen aus den 1960er Jahren, Straßennetz und wichtige Karteninhalte wurden in den 1980er Jahren fortgeführt. Ein Kartenblatt hat eine Ausdehnung von 5 mal 7,5 Bogenminuten, entsprechend etwa 10 mal 10 Kilometer. Neben den *geographischen Koordinaten* der vier Blattecken ist die Georeferenz durch das *UTM-Gitter* bezüglich des Europäischen Datums 1950 (*ED 50*) gegeben. Das Höhendatum ist durch den Pegel von Genua festgelegt.

4. Homologe Punkte für einen Vergleich der Alpenvereinskarten mit den Referenzdaten

Für die Bestimmung von Punktgenauigkeiten und die darauf folgende Georeferenzierung der Alpenvereinskarten müssen zunächst *homologe Punkte* in Alpenvereinskarte und Referenzdaten gefunden werden. Zu Beginn der Untersuchungen war demnach festzustellen, welche Punkte dafür geeignet sind. Der Inhalt einer Karte wird im Allgemeinen in Situation, Gewässer, Vegetation, Höhenschichten und Beschriftung unterschieden. Verlässliche homologe Punkte in Alpenvereinskarte und Referenzdaten konnten in den Bereichen Situation und Gewässernetz aufgefunden werden. Es handelt sich hierbei um Punkte, die nur durch Lageinformation bestimmt sind:

- Topographische Einzelobjekte (wie Berghütten, Kirchen, Kapellen, usw.)
- Straßenkreuzungen
- Brücken und Stege
- Mündungen und Verzweigungen linearer Gewässer
- Kreuzungen und Spitzkehren von Wanderwegen

Sucht man derartige Objekte aus Situation und Gewässernetz auf, so stellt man fest, dass sich ein Großteil davon in den Tallagen befindet. Verzerrungen sind jedoch gerade in den Felsregionen mit wenig Lageinformation zu erwarten. Unverzichtbar für eine optimale Gebietsabdeckung sind demnach Punkte, die durch Höheninformation festgelegt sind:

- Höchste und tiefste Punkte
- Sattelpunkte
- Schnittpunkte von Geländekanten
- Knicke von Zähllinien in *Geripplinien*
- Knicke der Wanderwege an Geripplinien

Um bei den Genauigkeitsuntersuchungen die Güte von Punkten mit unterschiedlicher Charakteristik beurteilen zu können, wurden diese in die zehn genannten Arten eingeteilt.

5. Punkterfassung in den Referenzdaten

Punkte, die sowohl in den Alpenvereinskarten als auch in den Referenzdaten zu identifizieren waren, wurden in beiden Unterlagen markiert und mit einer Nummer versehen. Diese *homologen Punkte* wurden daraufhin in den Referenzdaten *digitalisiert* und in das internationale Bezugssystem *WGS84* transformiert. Die in den Referenzdaten digitalisierten homologen Punkte sollen im Folgenden als **Passpunkte** bezeichnet werden. Die ihnen entsprechenden Punkte in der Alpenvereinskarte wurden später in den *Rasterdaten* durch eine *Bildschirmdigitalisierung* erfasst (vgl. Kapitel 7).

5.1 Festlegung und Nummerierung homologer Punkte in der Alpenvereinskarte und in den Referenzdaten

Es wurden Punkte der oben erläuterten Passpunktarten gesucht, die sowohl in der Alpenvereinskarte, als auch in den Referenzdaten eindeutig als homologe Punkte zu identifizieren waren. Diese Punkte wurden sowohl auf einer Folie markiert, die über die Alpenvereinskarte gelegt wurde, als auch auf einer Folie, die auf dem *Digitizer* über den Referenzdaten fixiert wurde. Außerdem wurden kodierte Punktnummern zur eindeutigen Identifikation vergeben und auf beiden Folien angeschrieben.

Aus praktischen Gründen für die *Digitalisierung* der Passpunkte und um eine schnelle Identifizierbarkeit dieser Punkte zu gewährleisten, wurden als Punktnummern 6-stellige Ziffernfolgen verwendet. Die Punktnummer wurde so kodiert, dass zum einen die Herkunft (Referenzdatenbestand) und zum anderen die Zuordnung zu einer der oben beschriebenen Passpunktarten leicht möglich war. Auf diese Weise konnten die Punktnummern auf Folie möglichst kurz notiert werden, was bei hoher Passpunktdichte enorm zur Übersichtlichkeit beiträgt.

5.2 Festlegung von Punkten für die Überführung der homologen Punkte von Digitizerkoordinaten in ein Landeskoordinatensystem

Wie unter 3. erläutert liegen die Referenzdaten je nach Herkunftsland mit unterschiedlicher Georeferenz vor. Diese ist in den Karten durch das Koordinatengitter bzw. den Kartenrahmen gegeben. Um die digitalisierten Passpunktkoordinaten in das jeweilige *Landeskoordinatensystem* überführen zu können, mussten neben den Passpunkten Punkte mit bekannter Georeferenz erfasst werden. Derartige Punkte sollen im Folgenden als **Referenzpunkte** bezeichnet werden. Über diese Punkte, von denen demnach sowohl die *Digitizerkoordinaten* als auch die Koordinaten in einem Landeskoordinatensystem bekannt waren, konnten durch eine *Affintransformation* die Passpunkte ebenfalls in das Landeskoordinatensystem transformiert werden. Der erhaltene Koordinatensatz wurde für die *Klafungsanalyse* benötigt (vgl. Kapitel 9).

5.2.1 Referenzpunkte in den Daten des Bayerischen Landesvermessungsamtes

In den Unterlagen des Bayerischen Landesvermessungsamtes ist die Georeferenz durch die Gitterpunkte des Soldnerblattschnittes gegeben. In den verwendeten Folien befanden sich mindestens sechs und maximal neun solcher Soldnergitterpunkte. Da für die weiteren Auswertungen statt *Soldnerkoordinaten Gauß-Krüger-Koordinaten* zur Verfügung stehen sollten, wurden die Gauß-Krüger-Koordinaten der Soldnergitterpunkte ermittelt. Dazu stand ein Programm des Bayerischen Landesvermessungsamtes zur Verfügung, das nach Eingabe von Schichte und Reihe eines Soldnerblattes dessen vier Blatteckenwerte in Gauß-Krüger-Koordinaten liefert.

5.2.2 Referenzpunkte in den Daten des Österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen

Die Manuskriptkarten des Österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen umfassen je ein Gebiet von drei auf drei Kilometer. Dementsprechend ist auch die Georeferenz über ein 1-mal-1-Kilometer-Gitter vorgegeben, welches runde 1000-Meter-Werte im österreichischen Gauß-Krüger-System (System MGI) aufweist. Auf jeder Manuskriptkarte befinden sich 16 solcher Gitterpunkte (siehe Abb. 2a).

5.2.3 Referenzpunkte in den Daten des Istituto Geografico Militare

Die Karten des Istituto Geografico Militare enthalten das UTM-Gitter bezogen auf das *ED 50*. Zur Herstellung der Georeferenz wurde eine Auswahl dieser Gitterpunkte verwendet.

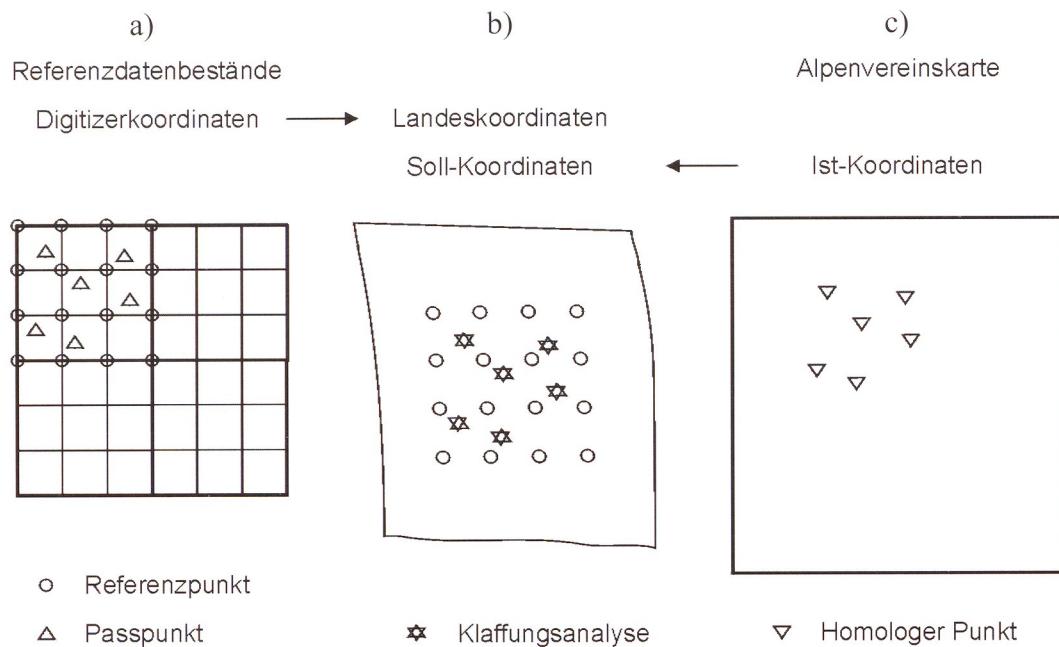


Abb. 2: a) Digitalisierung der Passpunkte und Referenzpunkte in den Referenzdatenbeständen am Beispiel der Österreichischen Manuskriptkarten.
 b) Affintransformation der Passpunkte von Digitizerkoordinaten in Landeskoordinaten mit den Referenzpunkten als identische Punkte.
 c) Affintransformation der homologen Punkte von Kartenkoordinaten in Landeskoordinaten mit anschließender Klaffungsanalyse.

5.3 Digitalisierung der Passpunkte und Referenzpunkte

Jede Passpunktart und die Referenzpunkte wurden in einem separaten Arbeitsgang nach aufsteigender laufender Punktnummer digitalisiert und in getrennten Dateien abgelegt.

Für jede Einheit des Referenzdatenbestands (z.B. jede Manuskriptkarte) entstand somit je eine Datei für jede Passpunktart und eine Datei für die Referenzpunkte.

6. Transformation der Passpunkte in ein Landeskoordinatensystem

Die Passpunkte lagen unmittelbar nach der Digitalisierung nur im Koordinatensystem des Digitizers vor. Für die Genauigkeitsuntersuchung wurden jedoch deren Koordinaten in einem *Landeskoordinatensystem* benötigt. Die *Koordinatentransformation* erfolgte über die Referenzpunkte (siehe Abb. 2b).

6.1 Bestimmung der Transformationsparameter zur Umrechnung von Digitizerkoordinaten in Landeskoordinaten

Die Referenzpunkte lagen in *Digitizerkoordinaten* und im jeweiligen *Landeskoordinatensystem* vor. Über diese beiden Koordinatensätze konnte eine *Affintransformation* angesetzt werden und die *Transformationsparameter* zum Übergang von Digitizerkoordinatensystem jeder Referenzdateneinheit in das Landeskoordinatensystem ermittelt werden. Für jeden Referenzpunkt ergaben sich hierbei *Klaffungen* in x und y.

Für die bayerischen Unterlagen ergab sich ein mittlerer Klaffungsbetrag von etwa einem Meter für die Referenzpunkte; keiner der Punkte musste als Ausreißer aus der Ausgleichung herausgenommen werden.

Da es sich bei den österreichischen Manuskriptkarten im Gegensatz zu den bayerischen Unterlagen nicht um Originale sondern um Kopien handelt, wiesen einige Punkte, vor allem an den Ecken, größere *Klaffungsbeträge* auf. Da mit 16 Referenzpunkten in den Manuskriptkarten die *Redundanz* für die Transformation hoch genug war, konnten Punkte mit hohen Klaffungsbeträgen aus der Bestimmung der *Transformationsparameter* herausgenommen werden. Die durchschnittlichen Klaffungsbeträge der Referenzpunkte in den Manuskriptkarten lagen dann bei etwa zwei Meter.

Das in den italienischen Militärkarten eingedrückte Kartengitter ließ ebenfalls eine sichere Bestimmung der Transformationsparameter zu. Die Beträge der Klaffungen in den Referenzpunkten lagen im Durchschnitt bei etwa zwei Meter.

6.2 Transformation der Passpunkte in das Landeskoordinatensystem

Die Passpunkte konnten nun über die für die jeweilige Referenzdateneinheit geltenden *Affinparameter* in das jeweilige Landeskoordinatensystem transformiert werden.

Für die Arbeitsschritte 6.1 und 6.2 wurde ein Programm entwickelt, welches in einem Arbeitsgang die Transformationsparameter bestimmt und anschließend die Transformation der Passpunkte ausführt. Das Programm benötigt als Eingabeinformation

- die beiden Koordinatensätze der Referenzpunkte und
- die Digitizerkoordinaten der Passpunkte

und liefert als Ausgabeinformation

- die transformierten Referenzpunktkoordinaten mit zugehörigen Klaffungsbeträgen,
- die Parameter der Affintransformation und
- die Landeskoordinaten der Passpunkte.

6.3 Kontrolle der Transformation über gemeinsame Punkte in den einzelnen Referenzdateneinheiten

Zwischen den Referenzdateneinheiten existieren Verknüpfungspunkte. Solche gemeinsamen Punkte liegen in den photogrammetrischen Auswertungen des Bayerischen Landesvermessungsamtes in Form von Durchstechpunkten an den Ecken des jeweiligen TK 25-Viertels vor. Bei den österreichischen Daten sind es die vier in den Ecken der Folie liegenden Punkte des 1-mal-1-Kilometergitters. Diese Punkte sollten bei der Transformation vom jeweiligen Digitizerkoordinaten- system in das Landeskoordinatensystem gleiche Koordinatenwerte erhalten. Nicht identische Koordinaten für gemeinsame Punkte könnten durch einen Verzug der Referenzdatenfolien bedingt sein. Sind die Abweichungen groß, sollten die Folien auf ihre Maßhaltigkeit hin überprüft werden. Im vorliegenden Arbeitsmaterial war dies nicht der Fall.

7. Punkterfassung in den Alpenvereinskarten und Bestimmung der Restklaffungen in den Passpunkten

Die homologen Punkte wurden in den *Rasterdaten* der Alpenvereinskarten digitalisiert und somit ihre Ist-Koordinaten ermittelt. Aus dem Vergleich zwischen Soll- und Ist-Koordinaten mittels Affintransformation ergaben sich die *Klaffungen* in den Punkten (siehe Abb. 2c).

7.1 Digitalisierung der homologen Punkte in den Rasterdaten der Alpenvereinskarten

Für die homologen Punkte wurden – wie bisher erläutert – zunächst die Soll-Koordinaten im jeweiligen *Landeskoordinatensystem* bestimmt. Die Ist-Koordinaten dieser Punkte in den Alpenvereinskarten wurden in Form einer *Bildschirm-digitalisierung* ermittelt. Die identifizierten homologen Punkte wurden im CAD- Programm MicroStation als Punktsymbol (Kreuz mit konzentrischem Kreis) mit zugehöriger Punktnummer abgespeichert. Die somit ermittelten Ist-Koordinaten wurden in eine ASCII-Datei extrahiert.

7.2 Berechnung der Restklaffungen in den Passpunkten

Mit den Ist-Koordinaten der homologen Punkte als Quellkoordinaten und den Soll-Koordinaten als Zielkoordinaten wurde eine *Affintransformation* angesetzt.

Bestimmt wurden die Parameter zur Transformation vom Koordinatensystem am Bildschirm in das als Georeferenz dienende Landeskoordinatensystem, die Restklaffungen der *Passpunkte* nach der Transformation und einige Genauigkeitsparameter der Transformation (vgl. Kapitel 9). Hierfür wurde ein spezielles Analyseprogramm entwickelt, das die Berechnungen für alle Passpunkte (gemeinsame Ausgleichung), nur für bestimmte Passpunktarten oder für jede Passpunktart einzeln (getrennte Ausgleichung) ausführt. Die Ergebnisse dieser Analyse mittels Affintransformation sind in Kapitel 9 dargestellt.

8. Bereitstellung der Datensätze für eine Gesamtanalyse der Untersuchungsgebiete „Karwendelgebirge“ und „Zillertaler Alpen“

In den Untersuchungsgebieten „Karwendelgebirge“ und „Zillertaler Alpen“ kamen je zwei unterschiedliche Referenzdatenbestände zum Einsatz. Diesen Referenzdaten lagen unterschiedliche Georeferenzierungen zu Grunde. Wie oben erläutert sind dies für Bayern deutsche *Gauß-Krüger-Koordinaten* bezüglich des Bessel-*Ellipsoids*, für Österreich österreichische *Gauß-Krüger-Koordinaten* (System MGI) bezüglich des Bessel-Ellipsoids, für Italien *UTM-Koordinaten* bezüglich des Internationalen Ellipsoids von 1924 (*Europäisches Datum 1950*).

Für die Gesamtanalyse der Untersuchungsgebiete mussten die Passpunktkoordinaten in ein einheitliches Bezugssystem transformiert werden. Da im Rahmen der Untersuchungen auch eine Georeferenzierung in einem internationalen Bezugssystem gefordert war, lag es nahe, für die Gesamtanalyse UTM-Koordinaten bezüglich des internationalen Bezugssystems *WGS 84* zu verwenden.

Für die beiden Untersuchungsgebiete mussten dazu die im Folgenden beschriebenen Koordinatenumformungen vollzogen werden; vergleiche hierzu die Veröffentlichungen (EHLERT, 1991; IHDE et al., 1995 a und b; SCHUHR, 1997).

8.1 Berechnung von Passpunktkoordinaten für die Gesamtanalyse im Untersuchungsgebiet „Karwendelgebirge“

Ausgangspunkt waren die aus den bayerischen Referenzdaten erhaltenen deutschen *Gauß-Krüger-Koordinaten*. Diese wurden in *geographische Koordinaten* auf dem Bessel-Ellipsoid umgerechnet. Wesentlicher Schritt war der *Ellipsoidübergang* vom Bessel-Ellipsoid auf das durch das WGS 84 festgelegte Ellipsoid. Hierfür wurden die Formeln zur *Datumstransformation* nach Molodenskij verwendet. Die somit erhaltenen Koordinaten beziehen sich auf das WGS 84. Ab-

schließend musste lediglich die *UTM-Abbildung* auf die geographischen Koordinaten angewendet werden. Die *Passpunkte* aus den bayerischen Referenzdaten lagen nun in UTM-Koordinaten bezüglich WGS 84 vor.

Auch die Passpunkte aus den österreichischen Referenzdaten mussten in dieses Bezugssystem überführt und dabei größtmögliche Homogenität gewährleistet werden. Dies wurde durch eine ebene Transformation über *identische Punkte* erreicht. Aus 21 Gipfelpunkten, die sowohl in den bayerischen Referenzdaten als auch in den österreichischen Referenzdaten zu identifizieren waren, wurden die *Transformationsparameter* für eine *Affintransformation* ermittelt. Die Klaffungen in den identischen Punkten lagen im Durchschnitt bei 7,5 Meter. Mittels ebener Affintransformation wurden somit die österreichischen Gauß-Krüger-Koordinaten direkt in UTM-Koordinaten umgerechnet.

8.2 Berechnung von Passpunktkoordinaten für die Gesamtanalyse im Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen“

Im Allgemeinen war der Ablauf für die Überführung der Passpunktkoordinaten in UTM-Koordinaten bezüglich des WGS 84 identisch mit dem unter 8.1 beschriebenen. Bei der Umrechnung der österreichischen Gauß-Krüger-Koordinaten in geographische Koordinaten auf dem Bessel-Ellipsoid musste der Verschiebungsbetrag von $\Delta L = 17^\circ 40'$ (wegen des österreichischen Längenbezugs nach Ferro) berücksichtigt werden.

Die Datumstransformation wurde auf die aus den österreichischen Referenzdaten erhaltenen Passpunkte angewandt. Da jedoch keine Parameter für die Datumstransformationsformeln nach Molodenskij vorlagen, wurde der Ellipsoidübergang über eine räumliche 7-Parameter-Transformation in kartesischen Koordinaten vollzogen. Als Zwischenschritt musste die Umrechnung von geographischen in geozentrische kartesische Koordinaten und umgekehrt vor bzw. nach der 7-Parameter-Transformation eingeführt werden.

Die Umrechnung der Passpunkte des italienischen Gebietes erfolgte wiederum durch eine ebene Affintransformation. Der Parametersatz wurde aus 13 identischen Gipfelpunkten ermittelt, deren Klaffungen im Durchschnitt bei 7,0 Meter lagen.

9. Klaffungsanalyse

Für die homologen Punkte lagen ein Datensatz mit den Sollkoordinaten (*UTM-Koordinaten* bezüglich *WGS 84*) und ein Datensatz mit den Istkoordinaten (Kar-

tenkoordinaten) vor. Über diese beiden Datensätze wurde eine *Affintransformation* angesetzt. Als Ergebnis erhielt man die orientierten Verschiebungsbeträge der homologen Punkte in der Alpenvereinskarte gegenüber dem als homogen betrachteten Referenzdatenbestand. Diese *Klaffungsvektoren* bildeten die Ausgangsinformation für die Klaffungsanalyse. Hierbei wurden die Beträge der Klaffungsvektoren und ihre Orientierung numerisch und visuell in Form von Plots beurteilt.

Da für die verschiedenen Länderanteile der Untersuchungsgebiete unterschiedliche Referenzdaten verwendet wurden und die verschiedenen Länderanteile auf unterschiedlichen geodätischen Grundlagen beruhen können, wurde zunächst jeder Anteil für sich einer Klaffungsanalyse unterzogen. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass für jeden Länderanteil der Untersuchungsgebiete nur die inneren Spannungen ohne äußere Einflüsse ermittelt wurden.

Ziel der Untersuchungen war es jedoch, für jedes Untersuchungsgebiet bzw. für jede Karte eine Abschätzung der Punktgenauigkeiten zu geben. Aus diesem Grund wurde für jedes Untersuchungsgebiet eine Gesamtanalyse durchgeführt. Hierbei traten in der Klaffungsanalyse ebenso innere Spannungen auf. Die Ermittlung globaler Widersprüche in den Untersuchungsgebieten wird in Kapitel 10 behandelt.

9.1 Klaffungsanalyse der Alpenvereinskarte „Karwendelgebirge - West“

9.1.1 Bayerischer Anteil des Untersuchungsgebiets

Insgesamt wurden im bayerischen Anteil des Untersuchungsgebiets „Karwendelgebirge“ (70 km^2) 405 Passpunkte erfasst. Die durchschnittliche Punktdichte liegt bei 5,8 Punkten je Quadratkilometer, entsprechend einem mittleren Punktabstand von 540 Metern. 45 Prozent der Passpunkte wurden aus Lageinformation und 55 Prozent aus Höheninformation gewonnen.

Der Tabelle 1 sind die im bayerischen Anteil des Untersuchungsgebiets „Karwendelgebirge“ ermittelten Punktgenauigkeiten zu entnehmen. Eine Diskussion der Resultate erfolgt für das gesamte Untersuchungsgebiet unter 9.1.3.

9.1.2 Österreichischer Anteil des Untersuchungsgebiets

Im österreichischen Anteil des Untersuchungsgebiets „Karwendelgebirge“ (65 km^2) konnten 201 homologe Punkte identifiziert werden. Damit errechnet sich eine durchschnittliche Punktdichte von 3,1 Punkten je Quadratkilometer bzw. ein mittlerer Punktabstand von 837 Metern. In diesem Gebiet ist mit 75 Prozent der Anteil der aus Höheninformation gewonnenen Punkte wesentlich höher als der aus Lageinformation gewonnenen Punkte.

In Tabelle 2 sind die im österreichischen Anteil des Untersuchungsgebiets „Karwendelgebirge“ ermittelten Punktgenauigkeiten aufgelistet.

Tabelle 1: Klaffungen in den Passpunkten im bayerischen Anteil des Untersuchungsgebiets "Karwendelgebirge"

| Passpunktart | Punktanzahl | Betrag der Klaffungsvektoren | | | |
|--|-------------|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| | | getrennte Ausgleichung | | gemeinsame Ausgleichung | |
| | | in der Natur [m] | in der Karte [mm] | in der Natur [m] | in der Karte [mm] |
| Alle Passpunktarten | 405 | — | — | 20,6 | 0,82 |
| Topographische Einzelobjekte | 38 | 19,7 | 0,79 | 21,3 | 0,85 |
| Straßenkreuzungen | 26 | 10,4 | 0,42 | 14,3 | 0,57 |
| Brücken und Stege | 23 | 14,1 | 0,56 | 16,6 | 0,66 |
| Mündungen/Verzweigungen lin. Gewässer | 44 | 25,7 | 1,03 | 28,5 | 1,14 |
| Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen | 50 | 18,1 | 0,72 | 21,3 | 0,85 |
| Höchste und tiefste Punkte | 94 | 17,6 | 0,70 | 18,3 | 0,73 |
| Sattelpunkte | 18 | 20,7 | 0,83 | 23,5 | 0,94 |
| Schnittpunkte von Geripp- und Zähllinien | 78 | 21,3 | 0,85 | 21,6 | 0,86 |
| Knicke der Wanderwege an Geripplinien | 34 | 16,8 | 0,67 | 18,2 | 0,73 |

Tabelle 2: Klaffungen in den Passpunkten im österreichischen Anteil des Untersuchungsgebiets „Karwendelgebirge“

| Passpunktart | Punktanzahl | Betrag der Klaffungsvektoren | | | |
|--|-------------|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| | | getrennte Ausgleichung | | gemeinsame Ausgleichung | |
| | | in der Natur [m] | in der Karte [mm] | in der Natur [m] | in der Karte [mm] |
| Alle Passpunktarten | 201 | — | — | 18,0 | 0,72 |
| Topographische Einzelobjekte | 12 | 11,8 | 0,47 | 16,9 | 0,68 |
| Straßenkreuzungen | 5 | 3,4 | 0,14 | 15,1 | 0,60 |
| Brücken und Stege | 13 | 17,5 | 0,70 | 21,3 | 0,85 |
| Mündungen/Verzweigungen lin. Gewässer | 12 | 16,9 | 0,68 | 22,5 | 0,90 |
| Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen | 9 | 12,6 | 0,50 | 16,7 | 0,67 |
| Höchste und tiefste Punkte | 73 | 16,4 | 0,66 | 16,7 | 0,67 |
| Sattelpunkte | 7 | 14,2 | 0,57 | 19,7 | 0,79 |
| Schnittpunkte von Geripp- und Zähllinien | 68 | 18,4 | 0,74 | 18,5 | 0,74 |
| Knicke der Wanderwege an Geripplinien | 2 | — | — | 17,1 | 0,68 |

9.1.3 Gesamtes Untersuchungsgebiet „Karwendelgebirge“

Im Untersuchungsgebiet „Karwendelgebirge“ wurden insgesamt 606 homologe Punkte in die Klaffungsanalyse eingebracht. Mit einer Gebietsausdehnung von etwa 135 km^2 errechnet sich eine mittlere Punktdichte von 4,5 Punkten je km^2 bzw. ein mittlerer Punktstand von etwa 570 Metern. Das bayerische Teilgebiet zeichnet sich gegenüber dem österreichischen durch eine wesentlich höhere Punktdichte aus (vgl. 9.1.1 und 9.1.2). Eine Begründung hierfür ist leicht finden:

Tabelle 3: Klaffungen in den Passpunkten im gesamten Untersuchungsgebiet „Karwendelgebirge“

| Passpunktart | Punktanzahl | Betrag der Klaffungsvektoren | | | |
|--|-------------|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| | | getrennte Ausgleichung | | gemeinsame Ausgleichung | |
| | | in der Natur [m] | in der Karte [mm] | in der Natur [m] | in der Karte [mm] |
| Alle Passpunktarten | 606 | — | — | 20,1 | 0,80 |
| Topographische Einzelobjekte | 50 | 19,4 | 0,78 | 21,1 | 0,84 |
| Straßenkreuzungen | 31 | 12,1 | 0,48 | 15,1 | 0,60 |
| Brücken und Stege | 36 | 16,8 | 0,67 | 18,6 | 0,74 |
| Mündungen/Verzweigungen lin. Gewässer | 56 | 25,9 | 1,04 | 27,6 | 1,10 |
| Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen | 59 | 18,1 | 0,72 | 21,2 | 0,85 |
| Höchste und tiefste Punkte | 167 | 17,4 | 0,70 | 17,6 | 0,70 |
| Sattelpunkte | 25 | 21,0 | 0,84 | 21,8 | 0,87 |
| Schnittpunkte von Geripp- und Zähllinien | 146 | 20,5 | 0,82 | 20,7 | 0,83 |
| Knicke der Wanderwege an Geripplinien | 36 | 17,1 | 0,68 | 18,5 | 0,74 |

Die bayerischen Auswertungen wurden zur Herstellung der Topographischen Karten 1:25 000 verwendet, die österreichischen sind die Basis für die Topographischen Karten 1:50 000 und weisen daher einen höheren *Generalisierungsgrad* auf, der weniger Detailinformation zulässt.

Die durch Höheninformation festgelegten Punkte liefern mit über 60 Prozent den Hauptanteil der Passpunkte und leisten vor allem in den Hochlagen einen Beitrag zu einer weitestgehend flächendeckenden Passpunktbesetzung.

Aus den Richtungen der Klaffungsvektoren ist keine Systematik erkennbar. Eine Abgrenzung von Gebieten, die vom selben Standpunkt aus aufgenommen wurden, ist aus dem Klaffungsbild nicht möglich, da nirgendwo eine bevorzugte Richtung der Vektoren ersichtlich ist.

Die mittlere Größe der Klaffungsbeträge liegt bei 20 m. Eine angenommene Auflösung von 0,2 mm (Zeichengenauigkeit) in der Alpenvereinskarte würde bedeuten, dass im vorliegenden Maßstab 1:25 000 Punkte mit einer Genauigkeit von maximal 5 m aus der Karte abgegriffen werden können. Zieht man in Betracht, dass in der vorliegenden Karte die Signaturen Breiten von etwa 0,3 mm bis 1,0 mm einnehmen, erscheinen die mittleren Beträge der Klaffungsvektoren im Kartenmaßstab mit etwa 0,8 mm vergleichsweise klein (vgl. Tabelle 3). Die im Untersuchungsgebiet der Alpenvereinskarte „Karwendelgebirge – West“ ermittelte Genauigkeit ist aufgrund der genannten Werte für eine Wanderkarte durchaus angemessen.

Im Folgenden sollen die Genauigkeiten der in Kapitel 4 erläuterten Passpunktarten diskutiert werden:

Die am besten definierten Lagepunkte sind **Straßenkreuzungen** sowie **Brücken und Stege** mit durchschnittlichen Klaffungsbeträgen von 12 m bei getrennter Ausgleichung (15 m bei gemeinsamer Ausgleichung) bzw. 17 m (19 m). Bei den **topographischen Einzelobjekten** wie Kirchen, Wegekreuzen, Hütten u.ä. sowie bei markanten Punkten der **Wanderwege** wie **Verzweigungen und Spitzkehren** liegen die mittleren Klaffungen bei 19 m (21 m).

Besonders unscharf definiert sind im vorliegenden Gelände offensichtlich die **Mündungen von Gewässern**. Deren Klaffungsbeträge erreichen im Durchschnitt beinahe 30 m. Zurückzuführen ist dieser Effekt zum einen darauf, dass die Gewässer oft in einem spitzen Winkel mit schleifendem Schnitt zusammenfließen, und zum anderen Schutt und Geröll bereits bei der terrestrischen Aufnahme eine genaue Festlegung des Schnittpunkts erschweren.

Bei den aus Höheninformation gewonnenen Passpunkten haben die **höchsten und tiefsten Punkte** mit 17 m (18 m) die geringsten Restklaffungen. Erstaunlich gut sind auch die Klaffungsbeträge bei den **Sattelpunkten** mit 21 m (22 m), nachdem diese Punkte zwar mathematisch exakt definierbar, im Gelände aber meist lagmäßig nicht gut bestimmbar sind. Der größte Teil der hier beteiligten Sattelpunkte befindet sich im Fels. Die in einem Joch liegenden Punkte wurden offenbar bei der Aufnahme genau eingemessen und auch in der Alpenvereinskarte durch eine Signatur gekennzeichnet.

Da das Höhendatum der bayerischen und der österreichischen Referenzdaten mit dem der Alpenvereinskarte „Karwendelgebirge - West“ übereinstimmt, konnten auch die **Schnittpunkte zwischen Geripplinien und Zähllinien** als homologe Punkte betrachtet werden. Derartige Punkte wurden vor allem an ausgeprägten Bergrücken und markant eingekerbten Schluchten erfasst. Hier tritt ein deutlicher Knick in den Höhenlinien auf, der eine scharfe Punktfestlegung erlaubte. Durch den durchschnittlichen Klaffungsbetrag von 21 m wurde diese bestätigt.

Ebenso scheinen die **Knicke der Wanderwege und Höhenlinien an Geripplinien** mit 17 m (19 m) Klaffung gute Passpunkte zu sein.

Kaum einen Einfluss auf Richtung und Länge der Klaffungsvektoren nehmen eine separate Ausgleichung der einzelnen Passpunktarten oder eine Ausdünnung der Passpunkte.

9.2 Klaffungsanalyse der Alpenvereinskarte „Zillertaler Alpen – West“

9.2.1 Österreichischer Anteil des Untersuchungsgebietes

Insgesamt wurden im österreichischen Anteil des Untersuchungsgebietes „Zillertaler Alpen“ (85 km^2) 279 Passpunkte erfasst. Zwei dieser Passpunkte wurden wegen grober Fehler oder nicht nachweisbar homologer Lage aus der Klaffungsanalyse und den weiteren Untersuchungen herausgenommen.

Tabelle 4: Klaffungen in den Passpunkten im österreichischen Anteil des Untersuchungsgebietes „Zillertaler Alpen“

| Passpunktart | Punktanzahl | Betrag der Klaffungsvektoren | | | |
|--|-------------|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| | | getrennte Ausgleichung | | gemeinsame Ausgleichung | |
| | | in der Natur [m] | in der Karte [mm] | in der Natur [m] | in der Karte [mm] |
| Alle Passpunktarten | 277 | — | — | 16,7 | 0,67 |
| Topographische Einzelobjekte | 14 | 11,3 | 0,45 | 15,6 | 0,62 |
| Straßenkreuzungen | 0 | — | — | — | — |
| Brücken und Stege | 0 | — | — | — | — |
| Mündungen/Verzweigungen lin. Gewässer | 20 | 28,4 | 1,14 | 29,9 | 1,20 |
| Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen | 10 | 14,8 | 0,59 | 19,7 | 0,79 |
| Höchste und tiefste Punkte | 83 | 16,0 | 0,64 | 16,0 | 0,64 |
| Sattelpunkte | 13 | 11,4 | 0,46 | 13,9 | 0,56 |
| Schnittpunkte von Geripp- und Zähllinien | 137 | 15,2 | 0,61 | 15,3 | 0,61 |
| Knicke der Wanderwege an Geripplinien | 0 | — | — | — | — |

Tabelle 5: Klaffungen in den Passpunkten im italienischen Anteil des Untersuchungsgebietes „Zillertaler Alpen“

| Passpunktart | Punktanzahl | Betrag der Klaffungsvektoren | | | |
|--|-------------|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| | | getrennte Ausgleichung | | gemeinsame Ausgleichung | |
| | | in der Natur [m] | in der Karte [mm] | in der Natur [m] | in der Karte [mm] |
| Alle Passpunktarten | 56 | — | — | 22,0 | 0,88 |
| Topographische Einzelobjekte | 7 | 14,6 | 0,58 | 27,0 | 1,08 |
| Straßenkreuzungen | 6 | 5,1 | 0,20 | 15,0 | 0,60 |
| Brücken und Stege | 7 | 10,1 | 0,40 | 17,5 | 0,70 |
| Mündungen/Verzweigungen lin. Gewässer | 4 | 3,4 | 0,14 | 21,7 | 0,87 |
| Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen | 4 | 8,2 | 0,33 | 28,9 | 1,16 |
| Höchste und tiefste Punkte | 28 | 21,3 | 0,85 | 22,5 | 0,90 |
| Sattelpunkte | 0 | — | — | — | — |
| Schnittpunkte von Geripp- und Zähllinien | 0 | — | — | — | — |
| Knicke der Wanderwege an Geripplinien | 0 | — | — | — | — |

Aufgrund des Hochgebirgscharakters des Untersuchungsgebietes waren keine Verkehrswege und keine Brücken als Passpunkte auffindbar. Ebenso befanden sich nur wenige Wanderwege im Untersuchungsgebiet, von denen nur eine Auswahl in den Referenzdaten (Manuskriptkarten des BEV) vorhanden ist. Dies spiegelt sich auch darin wieder, dass die 277 Passpunkte nur zu 16 Prozent auf Lageinformation und zu 84 Prozent auf Höheninformation basieren. Einige Flächen wie Gletscher und der Schlegeisspeicher mussten ganz von der Passpunktbestimmung ausgespart bleiben.

Aus den Richtungen der Klaffungsvektoren ist an einigen Stellen eine Systematik erkennbar.

In Tabelle 4 sind die im österreichischen Anteil des Untersuchungsgebietes „Zillertaler Alpen“ ermittelten Punktgenauigkeiten aufgelistet. Eine Diskussion der Resultate erfolgt für das gesamte Untersuchungsgebiet unter 9.2.3.

9.2.2 Italienischer Anteil des Untersuchungsgebietes

Im italienischen Anteil des Untersuchungsgebietes „Zillertaler Alpen“ (40 km^2) konnten 60 homologe Punkte aufgefunden werden. Davon konnten vier Punkte nicht verwendet werden, da sie in den (gegenüber der Papierkarte) überarbeiteten *Rasterdaten* bei der Bildschirmsdigitalisierung nicht auffindbar waren. Mit den verbleibenden 56 Punkten errechnet sich eine durchschnittliche Punktdichte von 1,5 Punkten je Quadratkilometer bzw. ein mittlerer Punktabstand von 1020 Metern. In diesem Gebiet konnten aus der Höheninformation lediglich die höchsten und tiefsten Punkte ermittelt werden. Die Schnittpunkte zwischen Geripp- und Zähllinien konnten nicht verwertet werden, da das Höhendatum der italienischen Referenzdaten nicht mit demjenigen der Alpenvereinskarte übereinstimmt. Bereits ein um wenige Meter versetztes Höhenniveau führt zu einer Lageverschiebung der Höhenlinien. Die Schnittpunkte zwischen Geripp- und Zähllinien wären durch diesen Effekt systematisch verfälscht; eine objektive Genauigkeitsaussage wäre in diesem Fall nicht möglich.

Tabelle 5 sind die im italienischen Anteil des Untersuchungsgebietes „Zillertaler Alpen“ ermittelten Punktgenauigkeiten zu entnehmen.

9.2.3 Gesamtes Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen“

Das Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen“ wird durch 333 homologe Punkte abgedeckt. In dem etwa 125 km^2 umfassenden Gebiet konnte eine mittlere Punktdichte von 2,7 Punkten je km^2 bzw. ein mittlerer Punktabstand von etwa 730 Metern erzielt werden. Gegenüber dem Untersuchungsgebiet „Karwendelgebirge“ fällt die Punktdichte deutlich niedriger aus. Dies ist zum einen durch den höheren Generalisierungsgrad der hier verwendeten Referenzdaten zu begründen, zum anderen weist das gesamte vorliegende Untersuchungsgebiet Hochgebirgscharakter mit geringer künstlich geschaffener Topographie auf. Homologe Punkte aus den Bereichen Einzelobjekte und Verkehrswege konnten daher nur in geringem Umfang gefunden werden. Es ergibt sich daher, dass der Anteil der aus Höheninformation ermittelten Punkte bei über 75 Prozent liegt.

Im Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen“ ist aus den Richtungen der Klaffungsvektoren nur an wenigen lokalen Stellen eine Systematik erkennbar. Eine lokale *Entzerrung* ist wegen der geringen Klaffungsbeträge und der überraschend hohen Homogenität offenbar nicht notwendig.

Für das gesamte Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen“ errechnet sich aus der Affintransformation über alle Passpunktarten ein mittlerer Klaffungsbetrag

von 19 Metern. Bei der Analyse des Untersuchungsgebiets „Karwendelgebirge“ wurde mit einem mittleren Betrag von 20 Metern beinahe der gleiche Wert erhalten. Auch die einzelnen Passpunktarten zeigen vergleichbare Genauigkeitseigenschaften wie im Untersuchungsgebiet „Karwendelgebirge“ (vgl. Tab. 3 und 6).

Auch hier sind die **Straßenkreuzungen** sowie **Brücken und Stege** mit 5 m (15 m) bzw. 10 m (17 m) besser als der Durchschnitt definiert, ihre Anzahl ist jedoch gering. Ebenfalls unter dem Durchschnittswert liegen die **Knicke der Höhenlinien an Geripplinien** mit Klaffungsbeträgen von durchschnittlich 15 m (16 m). Diese Art von Passpunkten zeigt anscheinend deshalb so gute Werte, da sowohl die Höhenlinien in der Alpenvereinskarte, als auch diejenigen in den Referenzdaten auf strenger photogrammetrischer Auswertung beruhen, worin jeder Knick exakt abgebildet wird. Andererseits sind derartige Passpunkte auch dringend notwendig, da in Gebieten mit wenig Lageinformation der Karteninhalt fast ausschließlich aus dem Höhenlinienbild besteht, aber ebenfalls auf geometrische Lagegenauigkeit untersucht werden soll. Der Großteil solcher Punkte liegt auf ausgeprägten Bergrücken und Graten sowie in stark eingekerbten Tälern und Rinnen.

Durchschnittliche Klaffungsbeträge von knapp 19 m (20 m) weisen die örtlich **höchsten und tiefsten** Punkte auf. Mit nur 11 m (13 m) sind auch in diesem Untersuchungsgebiet die **Sattelpunkte** erstaunlich exakt definiert. Die Lage im Fels mit scharfer Abgrenzungsmöglichkeit dürfte wie schon erläutert auch hier die Begründung dafür sein.

Bei den **Zusammenflüssen der Gewässer** tritt wie bei der Karte des Karwendelgebirges mit 27 m (28 m) der größte mittlere Klaffungsbetrag auf. Auch in den Zillertaler Alpen können sich die Gewässer innerhalb der Schutt- und

Tabelle 6: Klaffungen in den Passpunkten im gesamten Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen“

| Passpunktart | Punktanzahl | Betrag der Klaffungsvektoren | | | |
|--|-------------|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| | | getrennte Ausgleichung | | gemeinsame Ausgleichung | |
| | | in der Natur [m] | in der Karte [mm] | in der Natur [m] | in der Karte [mm] |
| Alle Passpunktarten | 333 | — | — | 18,8 | 0,75 |
| Topographische Einzelobjekte | 21 | 22,0 | 0,88 | 23,1 | 0,92 |
| Straßenkreuzungen | 6 | 5,1 | 0,20 | 14,6 | 0,58 |
| Brücken und Stege | 7 | 10,2 | 0,41 | 16,6 | 0,66 |
| Mündungen/Verzweigungen lin. Gewässer | 24 | 26,8 | 1,07 | 28,4 | 1,14 |
| Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen | 14 | 16,2 | 0,65 | 23,9 | 0,94 |
| Höchste und tiefste Punkte | 111 | 19,4 | 0,78 | 19,7 | 0,79 |
| Sattelpunkte | 13 | 11,4 | 0,46 | 13,4 | 0,54 |
| Schnittpunkte von Geripp- und Zähllinien | 137 | 15,2 | 0,61 | 16,1 | 0,64 |
| Knicke der Wanderwege an Geripplinien | 0 | — | — | — | — |

Geröllflächen verlagern und erschweren damit eine exakte und gleichbleibende Festlegung ihres Verlaufs und ihrer Mündungen.

Es ergibt sich somit, dass aus Höheninformation abgeleitete Passpunkte sowohl durch ihren hohen Anteil an der Gesamtzahl der Passpunkte, als auch durch ihre hohe Genauigkeit für eine präzise und möglichst flächendeckende Genauigkeitsanalyse der Karte dringend notwendig sind.

Das Verhältnis von Punktabgriffgenauigkeit (5 m, vgl. 9.1.3) zum mittleren Klaffungsbetrag liegt bei etwa 1 zu 4. Die Genauigkeit der Alpenvereinskarte „Zillertaler Alpen – West“ ist damit für eine Wanderkarte durchaus befriedigend.

9.3 Klaffungsanalyse der Alpenvereinskarte „Allgäuer – Lechtaler Alpen – West“

Im Untersuchungsgebiet „Allgäuer–Lechtaler Alpen“ wurden 121 homologe Punkte in die Klaffungsanalyse eingebracht. Bei einer Gebietsausdehnung von etwa 50 km² ergibt sich somit eine mittlere Punktdichte von 2,4 Punkten je km² bzw. ein mittlerer Punktabstand von 800 Metern. Der Anteil der durch Höheninformation festgelegten Punkte liegt bei etwa 45 Prozent. Diese Punkte leisten damit auch hier einen wesentlichen Beitrag zur Verdichtung des Punktnetzes.

Die Richtungen der Klaffungsvektoren weisen auch in diesem Untersuchungsgebiet keine Systematik auf.

Tabelle 7 sind die im Untersuchungsgebiet „Allgäuer–Lechtaler Alpen“ ermittelten Punktgenauigkeiten zu entnehmen.

Tabelle 7: Klaffungen in den Passpunkten im Untersuchungsgebiet „Allgäuer–Lechtaler Alpen“

| Passpunktart | Punktanzahl | Betrag der Klaffungsvektoren | | | |
|--|-------------|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| | | getrennte Ausgleichung | | gemeinsame Ausgleichung | |
| | | in der Natur [m] | in der Karte [mm] | in der Natur [m] | in der Karte [mm] |
| Alle Passpunktarten | 121 (160) | — | — | 29,2 (32,0) | 1,17 (1,28) |
| Topographische Einzelobjekte | 17 | 19,7 | 0,79 | 22,1 | 0,88 |
| Straßenkreuzungen | 6 | 25,8 | 1,03 | 51,3 | 2,05 |
| Brücken und Stege | 10 | 16,1 | 0,64 | 21,8 | 0,87 |
| Mündungen/Verzweigungen lin. Gewässer | 19 | 35,2 | 1,41 | 38,1 | 1,52 |
| Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen | 13 | 21,5 | 0,86 | 25,7 | 1,03 |
| Höchste und tiefste Punkte | 43 | 25,8 | 1,03 | 25,7 | 1,03 |
| Sattelpunkte | 13 | 31,2 | 1,25 | 36,2 | 1,45 |
| Schnittpunkte von Geripp- und Zähllinien | (39) | (38,6) | (1,54) | (39,8) | (1,59) |
| Knicke der Wanderwege an Geripplinien | 0 | — | — | — | — |

Die Klaffungsbeträge aller Passpunkte in dem überwiegend durch *Messtisch-aufnahme* erfassten Untersuchungsgebiet „Allgäuer–Lechtaler Alpen“ erreichen im Mittel einen Wert von 29 m. Gegenüber den beiden anderen Untersuchungsgebieten, die auf terrestrisch-photogrammetrischer Aufnahme basieren, ist dieser Wert um etwa 50 Prozent größer.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Klaffungsanalyse für die einzelnen Passpunktarten bewertet werden:

Nochmals wird durch die Analyse bestätigt, dass **Brücken und Stege** mit Klaffungsbeträgen von 16 m (22 m) die Punkte mit der höchsten Lagegenauigkeit sind; auch wenn hier eine Verschlechterung von etwa 25 Prozent gegenüber den anderen beiden Untersuchungsgebieten vorliegt.

Auch **topographische Einzelobjekte** wie Kirchen, Kapellen und eindeutig zu identifizierende Hütten sind mit ebenfalls 20 m (22 m) mittlerer Abweichung gut bestimmt. Dieser Wert unterscheidet sich kaum von dem in den anderen Untersuchungsgebieten ermittelten.

Die **Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen** besitzen einen durchschnittlichen Klaffungsbetrag von 22 m (26 m). Dieser Wert ist nur unbedeutend größer als in den anderen Karten.

Auffällig ist bei diesem Untersuchungsgebiet der hohe mittlere Klaffungsbetrag der **Straßenkreuzungen** von über 26 m (50 m). In den anderen Untersuchungsgebieten gehörten diese Punkte mit etwa 10 m (15 m) mittlerer Abweichung zu den am exaktesten definierten. Hierfür kommen zweierlei Erklärungen in Betracht: Zum einen wurden hier nur 6 solcher Punkte in geringem Abstand zueinander identifiziert, der Stichprobenumfang ist also sehr gering und räumlich begrenzt und der ermittelte Wert nicht repräsentativ. Zum anderen könnte dies ein Hinweis darauf sein, dass die Tallagen, in denen sich die Verkehrswege befinden, stärkere Verschiebungsbeträge aufweisen als die Hochlagen. Dieser Effekt wurde bei der Fortführung der Karte mehrmals beobachtet.

Wie schon bei den beiden anderen untersuchten Karten erweisen sich auch hier die **Gewässermündungen und -verzweigungen** mit einer durchschnittlichen Klaffung von 35 m (38 m) als unscharf definiert. Dies ist durch die leichte Verlagerungsmöglichkeit der Gewässer in den Schutt- und Geröllflächen bedingt.

Die **höchsten und tiefsten Punkte** erreichen einen mittleren Klaffungsbetrag, der mit 26 m besser als der Gesamtdurchschnitt aller Passpunktarten ist. Jedoch ist dieser Wert um etwa 40 Prozent größer als in den beiden anderen Untersuchungsgebieten.

Die **Sattelpunkte** hingegen liegen mit 31 m (36 m) über dem Gesamtdurchschnitt. Das ist ein deutlich schlechterer Wert als in den beiden anderen Karten festgestellt wurde. Die Sattelpunkte konnten in dem vorliegenden Gelände offenbar nicht exakter festgelegt werden.

Die **Schnittpunkte der Geripp- mit den Zähllinien** mussten bei diesem Untersuchungsgebiet unberücksichtigt bleiben, da derartige Punkte nur bei gleichem Höhenniveau der zu vergleichenden Kartenwerke eine verwertbare Aussage liefern. Weil das Kartenblatt „Allgäuer–Lechtaler Alpen – West“ auf unterschiedlichen Vermessungsgrundlagen basiert, ist ein homogener Höhenbezug nicht unbedingt gewährleistet. Zudem sind die Höhenlinien dieses Kartenblatts im Vergleich zu den anderen untersuchten Kartenblättern stark geglättet. Dies liegt an den unterschiedlichen Aufnahmeverfahren: die terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme ließ für die Blätter „Karwendelgebirge – West“ und „Zillertaler Alpen – West“ eine exakte Höhenlinienbestimmung zu, während die Alpenvereinskarte „Allgäuer–Lechtaler Alpen – West“ überwiegend auf Messtischaufnahme basiert, die in der Regel gröbere Höhenlinien erfasst als eine photogrammetrische Aufnahme.

9.4 Vergleich der Resultate aus den drei Untersuchungsgebieten

Eine graphische Analyse der Klaffungsvektoren ließ bereits erkennen, dass Richtung und Beträge der Klaffungsvektoren nach der Affintransformation in allen Untersuchungsgebieten zufällig verteilt sind. Aus den Klaffungsvektoren in den Untersuchungsgebieten „Karwendelgebirge“ und „Allgäuer–Lechtaler Alpen“ ist keine Richtungssystematik erkennbar (vgl. Abb. 3). Eine Abgrenzung von Gebieten, die vom selben Standpunkt aus aufgenommen wurden, ist aus dem Klaffungsbild nicht möglich, da nirgendwo eine bevorzugte Richtung der Vektoren ersichtlich ist. Beim Bearbeitungsgebiet „Zillertaler Alpen“ ist in den Richtungen der Klaffungsvektoren nur an wenigen lokalen Stellen eine Systematik erkennbar, die Beträge der Vektoren bleiben hierbei jedoch klein (vgl. Abb. 4).

Die numerische Analyse der Beträge zeigte, dass diese keine so großen Werte annehmen wie vor Beginn der Untersuchungen angenommen: Für die Alpenvereinskarten „Karwendelgebirge – West“ und „Zillertaler Alpen – West“ wurden in den Untersuchungsgebieten vergleichbare Genauigkeiten der Punkte ermittelt. Beide Karten weisen eine durchschnittliche Einzelpunktgenauigkeit von etwa 20 m in der Natur auf; dies entspricht 0,8 mm in der Karte (vgl. Tabelle 8a und b).

Im Untersuchungsgebiet der Alpenvereinskarte „Allgäuer–Lechtaler Alpen – West“ ergab sich für beinahe alle Punktarten eine etwas geringere Genauigkeit.

Die durchschnittliche Einzelpunktgenauigkeit liegt hier bei etwa 30 m in der Natur, entsprechend 1,2 mm in der Karte. Betrachtet man die unterschiedlichen Passpunktarten näher, so stellt man fest, dass in der Alpenvereinskarte „Allgäuer–Lechtaler Alpen – West“ höchste und tiefste Punkte gut bestimmt sind, während Sattelpunkte, Verkehrswege und Gewässer eine deutlich geringere Genauigkeit aufweisen (vgl. Tabelle 8a und b).

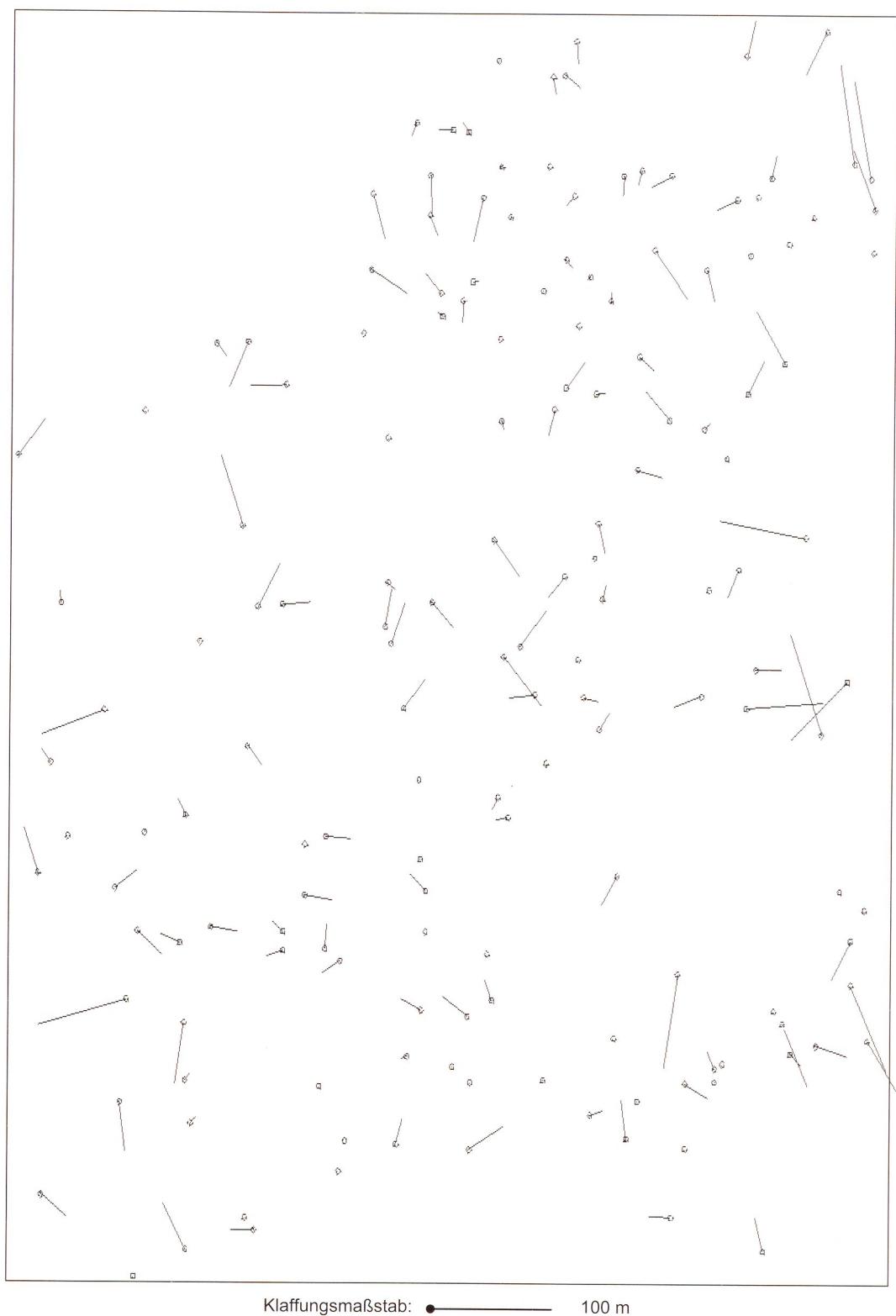


Abb. 3: Klaffungsvektoren nach der Affintransformation im Untersuchungsgebiet „Allgäuer–Lechtaler Alpen“

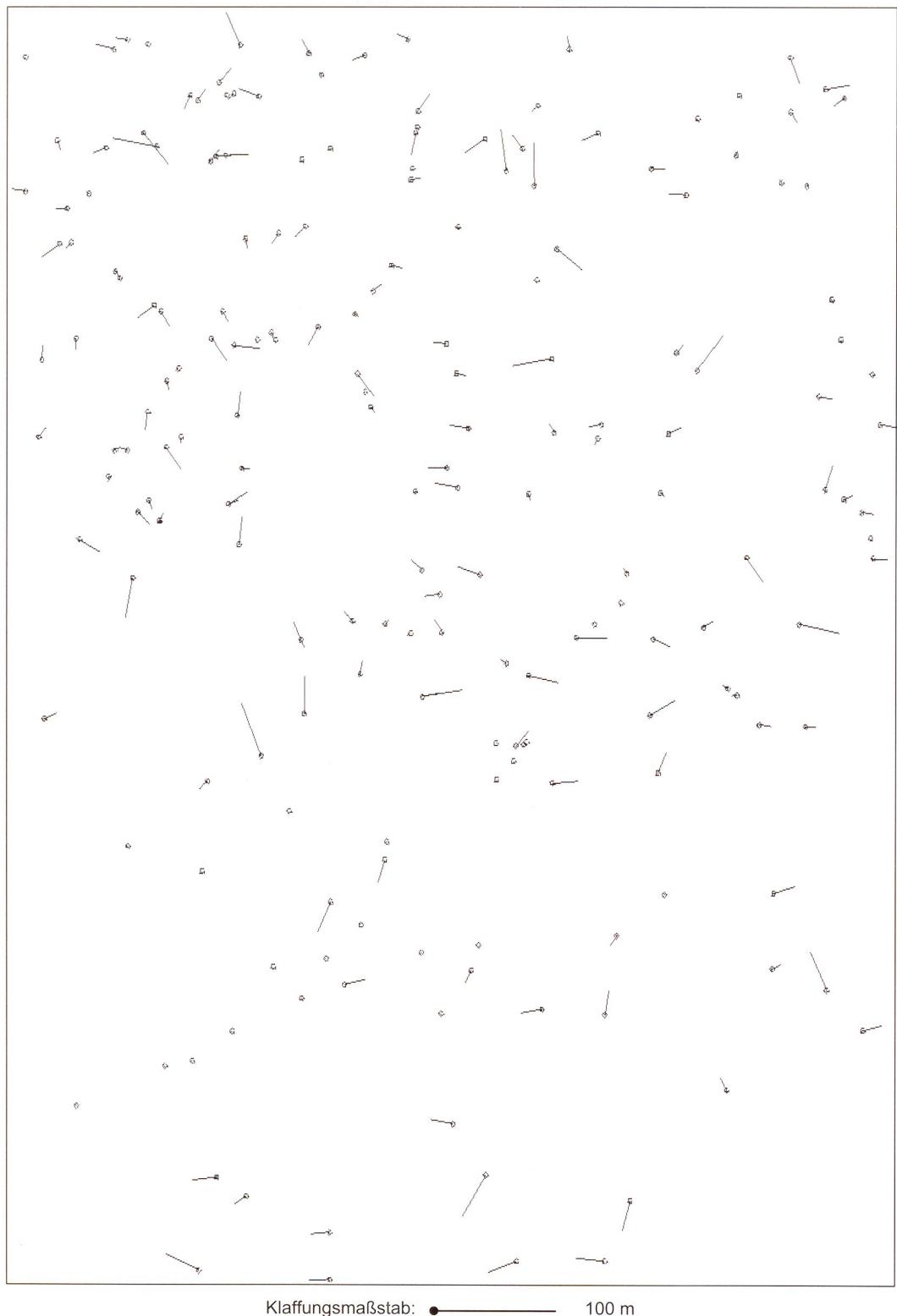


Abb. 4: Kloofungsvektoren nach der Affintransformation im Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen“

Tabelle 8a: Gegenüberstellung der Klaffungen in den Passpunkten in den drei Untersuchungsgebieten: getrennte Ausgleichung

| Vergleich der drei Untersuchungsgeb. | Betrag der Klaffungsvektoren | | | | | |
|--|------------------------------|------------|------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| Kartenblatt | Karwendelgebirge West | | Zillertaler Alpen West | | Allgäuer-Lechtaler Alpen West | |
| Passpunktart | Natur [m] | Karte [mm] | Natur [m] | Karte [mm] | Natur [m] | Karte [mm] |
| Topographische Einzelobjekte | 19,4 | 0,78 | 22,0 | 0,88 | 19,7 | 0,79 |
| Straßenkreuzungen | 12,1 | 0,48 | 5,1 | 0,20 | 25,8 | 1,03 |
| Brücken und Stege | 16,8 | 0,67 | 10,2 | 0,41 | 16,1 | 0,64 |
| Mündungen/Verzweigungen lin. Gewässer | 25,9 | 1,04 | 26,8 | 1,07 | 35,2 | 1,41 |
| Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen | 18,1 | 0,72 | 16,2 | 0,65 | 21,5 | 0,86 |
| Höchste und tiefste Punkte | 17,4 | 0,70 | 19,4 | 0,78 | 25,8 | 1,03 |
| Sattelpunkte | 21,0 | 0,84 | 11,4 | 0,46 | 31,2 | 1,25 |
| Schnittpunkte von Geripp- und Zähllinien | 20,5 | 0,82 | 15,2 | 0,61 | — | — |
| Knicke der Wanderwege an Geripplinien | 17,1 | 0,68 | — | — | — | — |

Tabelle 8b: Gegenüberstellung der Klaffungen in den Passpunkten in den drei Untersuchungsgebieten: gemeinsame Ausgleichung

| Vergleich der drei Untersuchungsgeb. | Betrag der Klaffungsvektoren | | | | | |
|--|------------------------------|------------|------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| Kartenblatt | Karwendelgebirge West | | Zillertaler Alpen West | | Allgäuer-Lechtaler Alpen West | |
| Passpunktart | Natur [m] | Karte [mm] | Natur [m] | Karte [mm] | Natur [m] | Karte [mm] |
| Alle Passpunktarten | 20,1 | 0,80 | 18,8 | 0,75 | 29,2 | 1,17 |
| Topographische Einzelobjekte | 21,1 | 0,84 | 23,1 | 0,92 | 22,1 | 0,88 |
| Straßenkreuzungen | 15,1 | 0,60 | 14,6 | 0,58 | 51,3 | 2,05 |
| Brücken und Stege | 18,6 | 0,74 | 16,6 | 0,66 | 21,8 | 0,87 |
| Mündungen/Verzweigungen lin. Gewässer | 27,6 | 1,10 | 28,4 | 1,14 | 38,1 | 1,52 |
| Kreuzungen und Spitzkehren von Wegen | 21,2 | 0,85 | 23,9 | 0,94 | 25,7 | 1,03 |
| Höchste und tiefste Punkte | 17,6 | 0,70 | 19,7 | 0,79 | 25,7 | 1,03 |
| Sattelpunkte | 21,8 | 0,87 | 13,4 | 0,54 | 36,2 | 1,45 |
| Schnittpunkte von Geripp- und Zähllinien | 20,7 | 0,83 | 16,1 | 0,64 | — | — |
| Knicke der Wanderwege an Geripplinien | 18,5 | 0,74 | — | — | — | — |

Für alle drei untersuchten Alpenvereinskarten wurde eine höhere Einzelpunktgenuigkeit nachgewiesen als vor den Untersuchungen angenommen. Die erhaltenen Resultate zeigen, dass die relative Genauigkeit der untersuchten Karten für die Orientierung im Gelände ausreichend ist. Soll jedoch eine zuverlässige absolute Positionsbestimmung über ein Koordinatengitter vorgenommen werden können, so muss die absolute Genauigkeit der Punkte in einem gewissen Rahmen liegen. Es müssen demnach auch die globalen Widersprüche der Alpenvereinskarten gegenüber einem Referenzsystem betrachtet werden. Den Untersuchungen zu dieser Problematik widmet sich das nächste Kapitel.

10. Ermittlung globaler Widersprüche in den Untersuchungsgebieten

Durch die Klaffungsanalyse wurden die lokalen Abweichungen von der Soll-Lage für die homologen Punkte ermittelt. Hierbei zeigte sich in keiner der untersuchten Alpenvereinskarten eine ausgeprägte Systematik in den Richtungen der Klaffungsvektoren. Fragt man nun nach möglichen globalen Verschiebungen, Verdrehungen oder anderen Verzerrungen innerhalb eines Kartenblattes, so kann man vermuten, dass an den Ländergrenzen derartige Effekte auftreten könnten. Da es zur Entstehungszeit der untersuchten Alpenvereinskarten noch keine länderübergreifenden Bezugssysteme wie das UTM-System gab, musste auf die unterschiedlichen Landessysteme zurückgegriffen werden. Bei der in der Regel graphischen Anpassung der Systeme aneinander konnten möglicherweise nicht alle Widersprüche beseitigt werden. Die Aufdeckung derartiger Widersprüche soll anschließend diskutiert werden.

10.1 Vorgehensweise zur Ermittlung von globalen Widersprüchen

Da bei der Klaffungsanalyse für die Alpenvereinskarten „Karwendelgebirge – West“ und „Zillertaler Alpen – West“ zunächst die einzelnen Länderanteile getrennt untersucht wurden, liegt für jeden Anteil ein Parametersatz für die Umrechnung von Kartenkoordinaten in UTM-Koordinaten vor. Wendet man nun die Transformationsparameter, die für den bayerischen Anteil in der Alpenvereinskarte „Karwendelgebirge – West“ ermittelt wurden, auch auf die Kartenpunkte an, die im österreichischen Anteil liegen, so erhält man für alle Punkte des Untersuchungsgebiets UTM-Koordinaten, die auf dem Parametersatz für Bayern basieren. Umgekehrt können die Kartenpunkte im bayerischen Anteil auch mit den Transformationsparametern für den österreichischen Anteil in UTM-Koordinaten umgerechnet werden. Nun liegen für jeden Punkt des gesamten Untersuchungsgebiets zwei Werte für die UTM-Koordinaten vor. Eine Differenzbildung zwischen diesen beiden Datensätzen lässt eine Aussage zu, inwieweit die verschiedenen Länderanteile einen Einfluss auf globale Widersprüche nehmen.

10.2 Globale Widersprüche in den Untersuchungsgebieten

Auf die homologen Punkte der Alpenvereinskarten „Karwendelgebirge – West“ und „Zillertaler Alpen – West“ wurde die unter 10.1 beschriebene Methode angewendet. Die dabei auftretenden Koordinatendifferenzen können als Vektoren dargestellt werden (vgl. Abb. 5 und 6). In beiden Fällen tritt sowohl im Betrag als auch in der Richtung der Vektoren eine Systematik auf.

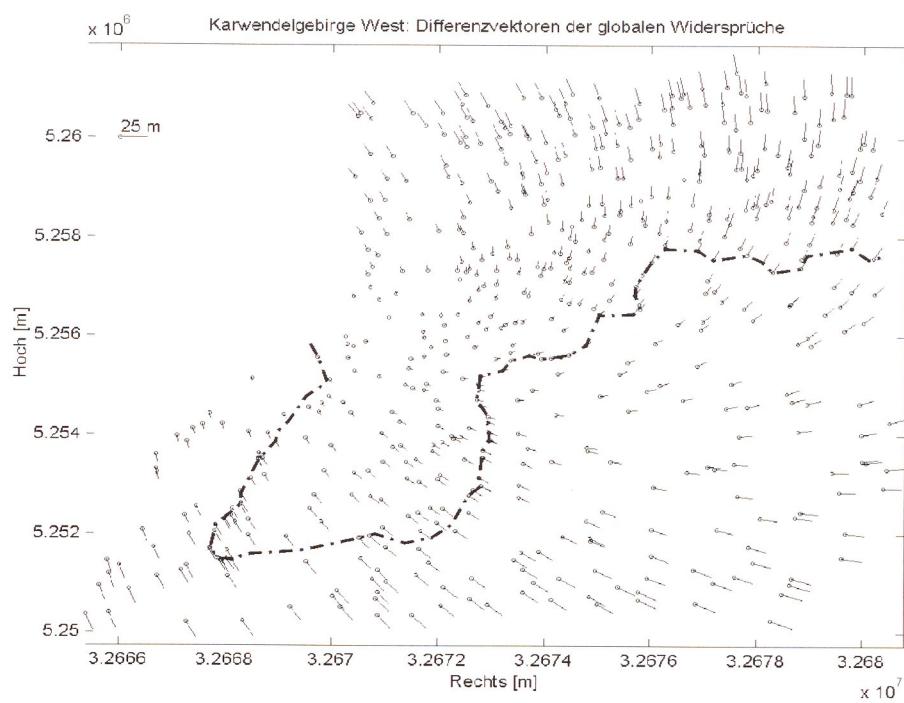


Abb. 5: Globale Widersprüche im Untersuchungsgebiet „Karwendelgebirge – West“

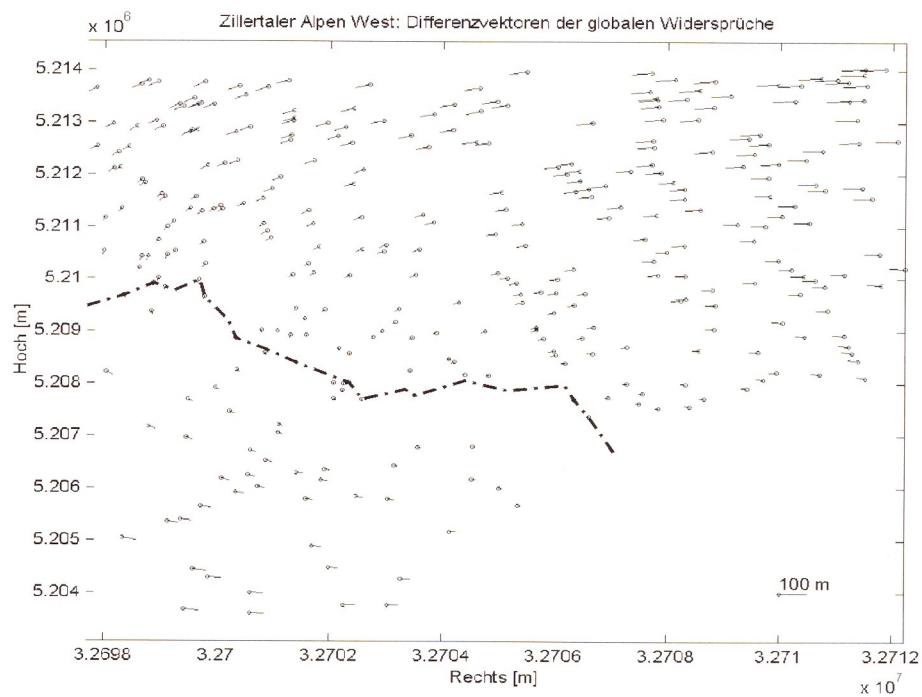


Abb. 6: Globale Widersprüche im Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen – West“

Im Untersuchungsgebiet „Karwendelgebirge – West“ erreichen die Differenzen maximale Beträge von etwa 25 m, während im Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen – West“ Differenzen bis zu 100 m auftreten.

Das Untersuchungsgebiet „Karwendelgebirge – West“ zeigt in den Richtungen der Differenzvektoren ein homogenes Verhalten. An der Ländergrenze tritt keine sprunghafte Richtungsänderung der Vektoren auf, jedoch weisen die Vektoren im bayerischen Gebiet tendenziell nach Norden, auf österreichischem Gebiet hingegen tendenziell nach Osten. Dadurch ergeben sich relative Differenzbeträge zwischen Nord- und Südrand des Untersuchungsgebietes von etwa 30 m und zwischen Ost- und Westrand von etwa 10 m. Die Differenzen bleiben damit im Rahmen der bereits bei der Genauigkeitsanalyse der Karte „Karwendelgebirge – West“ festgestellten Werte.

Im Untersuchungsgebiet „Zillertaler Alpen – West“ ist an der Ländergrenze eine Umkehrung der Richtung der Differenzvektoren zu beobachten. Auf österreichischem Gebiet zeigen die Vektoren nach Westen, während sie auf italienischem Gebiet nach Osten weisen. Da zudem die Differenzen Beträge von bis zu 100 m erreichen, errechnen sich relative Differenzen von über 100 m in Ost-West-Richtung. In Nord-Süd-Richtung treten dagegen nur relative Differenzen von maximal 10 m auf. Mit diesen Resultaten ist im Untersuchungsgebiet eine relative Verschiebung in Ost-West-Richtung von österreichischem zu italienischem Gebiet von etwa 100 m nachweisbar. Dies bestätigt die Erfahrungen der Alpenvereinskartographen, die bei der Kartenfortführung ebenfalls eine derartige Verschiebung beobachtet haben.

11. Georeferenzierung und Blatteckenwerte

11.1 Georeferenzierung

Bereits in der Klaffungsanalyse (vgl. Kapitel 9) wurde über die Soll- und die Ist-Koordinaten der homologen Punkte eine Affintransformation angesetzt. Hierbei konnten auch grob fehlerhafte Punkte aufgedeckt werden. Nach Elimination dieser Punkte aus den Datensätzen wurde über alle verbleibenden Punkte der Untersuchungsgebiete nochmals eine Affintransformation angesetzt. Für die Untersuchungsgebiete der drei bearbeiteten Alpenvereinskarten wurden die in Tabelle 9 zusammengestellten Transformationsparameter erhalten. Diese Parameter können folgendermaßen interpretiert werden:

Die Einheiten der Bildschirmdigitalisierung unter MicroStation waren Millimeter, die Einheiten der Referenzdaten Meter. Die Verschiebungsparameter sind daher für eine allgemeine Betrachtung nicht aussagekräftig. Die vorliegenden Maßstabsparameter hingegen stellen den Bezug zwischen diesen Einheiten her. Es ergibt sich somit ein Maßstab von etwa 1:25 100 für die untersuchten Gebiete.

Tabelle 9: Transformationsparameter der Affintransformation

| Untersuchungsgebiet | Maßstabsfaktor in y | Maßstabsfaktor in x | Rotation y-Achse [Grad] | Rotation x-Achse [Grad] |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Karwendelgebirge | 25,143 ±0,005 | 25,204 ±0,006 | -2,1 ±0,3 | -2,0 ±0,4 |
| Zillertaler Alpen | 25,184 ±0,005 | 25,060 ±0,008 | -2,1 ±0,3 | -2,0 ±0,5 |
| Allgäuer–Lechtaler Alpen | 24,936 ±0,003 | 25,256 ±0,002 | -1,6 ±0,3 | -1,5 ±0,1 |

Tabelle 10: Blatteckenwerte der Karte „Karwendelgebirge – West“

| Blattecken | Rechtswert UTM/WGS 84 [m] | Hochwert UTM/WGS 84 [m] |
|--------------|---------------------------|-------------------------|
| links oben | 32 664801 | 5260690 |
| rechts oben | 32 680320 | 5261248 |
| links unten | 32 665652 | 5236390 |
| rechts unten | 32 681171 | 5236947 |

Tabelle 11: Blatteckenwerte der Karte „Zillertaler Alpen – West“

| Blattecken | Rechtswert UTM/WGS 84 [m] | Hochwert UTM/WGS 84 [m] |
|--------------|---------------------------|-------------------------|
| links oben | 32 697483 | 5223272 |
| rechts oben | 32 713562 | 5223849 |
| links unten | 32 698110 | 5203370 |
| rechts unten | 32 714189 | 5203947 |

Tabelle 12: Blatteckenwerte der Karte „Allgäuer–Lechtaler Alpen – West“

| Blattecken | Rechtswert UTM/WGS 84 [m] | Hochwert UTM/WGS 84 [m] |
|--------------|---------------------------|-------------------------|
| links oben | 32 591627 | 5252176 |
| rechts oben | 32 604645 | 5252653 |
| links unten | 32 592173 | 5233030 |
| rechts unten | 32 605191 | 5233507 |

Die Rotationen sind für y- und x-Achse so gut wie identisch. Bei der Affintransformation erfolgt deshalb kaum eine Verdrehung der beiden Achsen gegeneinander. Für die Untersuchungsgebiete „Karwendelgebirge“ und „Zillertaler Alpen“ errechnet sich eine *Meridiankonvergenz* zwischen 1,7 bis 2,1 Grad, für das Untersuchungsgebiet „Allgäuer–Lechtaler Alpen“ um 1,0 Grad. Die in der Affin-

transformation ermittelten Rotationen decken sich sehr gut mit diesen Werten. Es ist daher anzunehmen, dass die Alpenvereinskarten nach dem geographischen Gitternetz genordet sind.

11.2 Blatteckenwerte

Die bei der abschließenden Affintransformation für jedes Untersuchungsgebiet ermittelten Parameter wurden zur *Georeferenzierung* des jeweiligen Gebietes verwendet. Damit ließen sich auch die Blatteckenwerte der untersuchten Alpenvereinskarten näherungsweise berechnen. Eine exakte Bestimmung der Blatteckenwerte ist nur möglich, wenn die homologen Punkte über das ganze Kartenblatt verteilt sind. Aufgrund der homologen Punkte in den Untersuchungsgebieten ergeben sich für die Blattecken der untersuchten Alpenvereinskarten die in den Tabellen 10 bis 12 aufgeführten Werte.

Exakt bestimmte Blatteckenwerte erlauben die Berechnung eines Kartengitters für die Alpenvereinskarten, nachdem mögliche signifikante Verzerrungen beseitigt worden sind.

12. Untersuchungen zur Entzerrung der Rasterdaten

Das vom Deutschen Alpenverein zur Fortführung der *Rasterdaten* verwendete *CAD-System* MicroStation in Verbindung mit den Softwaremodulen I/RAS B und I/RAS C zur Manipulation von *Rasterdaten* wurde auf seine Eignung zur *Entzerrung* der digitalen Alpenvereinskarten untersucht.

Dabei war in erster Linie zu prüfen, wie sich eine Entzerrung der Rasterdaten auf den Karteninhalt auswirkt. Die hierbei erhaltenen Ergebnisse werden unter Punkt 12.2 vorgestellt. Da die Software unterschiedliche Ansätze für eine Entzerrung bietet, wurde deren grundsätzliche Wirkungsweise zunächst anhand einer regelmäßigen Graphik ermittelt. Auch die durch die Software vorgegebenen Nutzungsmöglichkeiten wurden untersucht.

12.1 Untersuchungen zur Entzerrung mit dem bei der Kartenfortführung verwendeten CAD-System

12.1.1 Wirkungsweise der Entzerrungsmodelle

Die Softwaremodule I/RAS B und I/RAS C zur Manipulation von Rasterdaten beinhalten verschiedene Möglichkeiten für die Transformation von Rasterdaten.

Beide Softwaremodule bieten Modelle zur *Koordinatentransformation* und zur lokalen Entzerrung. Die Modelle zur lokalen Entzerrung basieren auf Polynomen höherer Ordnung bzw. auf einer maschenweisen Affintransformation. Mit steigender Ordnung wachsen notwendige Passpunktanzahl und *Redundanz*. Um die Wirkungsweise der verschiedenen Entzerrungsansätze zu untersuchen, wurde für diese mit einem regelmäßigen quadratischen Gitter ein Test durchgeführt. Dabei wurde das Softwaremodul I/RAS C verwendet.

Das regelmäßige quadratische Gitter wurde auf 36 neben den Gitterpunkten liegende *Passpunkte* eingepaßt und mit den genannten Modellen entzerrt. An den entstandenen Verzerrungen des Gitters lassen sich folgende Gesetzmäßigkeiten beobachten (vgl. Abb. 7 bis 10):

- Bei den Modellen basierend auf Polynomen höherer Ordnung schmiegt sich mit steigender Ordnung die Bildgeometrie immer mehr den Passpunkten an. Die *Residuen* werden klein. Dabei bleibt der Bildinhalt glatt, stetig und damit brechungsfrei.
- Das Modell, dem die maschenweise Affintransformation zugrunde liegt, führt zu unstetigen Stellen und damit zu Brechungen in der Bildgeometrie. Im Gegensatz zu allen anderen implementierten Modellen wird die Geometrie an den Passpunkten exakt auf diese eingepaßt. Beide Effekte sind durch einen Algorithmus mit vorheriger Dreiecksvermaschung bedingt.

Aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse kommen für eine lokale Entzerrung mit minimalen Residuen die beiden Modelle „Polynom 5. Ordnung“ und „maschenweise Affintransformation“ in Betracht. Da die Verzerrungsbeträge in der Regel nur punktweise und nicht – wie es optimal wäre – flächendeckend bekannt sind, ist eine exakte Reproduktion der Passpunkte nach der Entzerrung nicht in allen Fällen zu bevorzugen. Vielmehr ist eine weiche Entzerrung anzustreben, die sich den Passpunkten möglichst gut nähert. Demnach scheint als Alternative zum Modell „maschenweise Affintransformation“ das Modell „Polynom 5. Ordnung“ für eine lokale Entzerrung der Alpenvereinskarten gut geeignet zu sein.

12.1.2 Nutzungsmöglichkeiten der Transformations- bzw. Entzerrungswerkzeuge

Die beiden Softwaremodule I/RAS B und I/RAS C enthalten beinahe dieselben Transformations- bzw. Entzerrungsmodelle. In den zu verwendenden Datenformaten und den Bedienungsmöglichkeiten unterscheiden sich die beiden Softwaremodule jedoch.

Wägt man die Vor- und Nachteile der beiden Softwaremodule I/RAS B und I/RAS C gegeneinander ab, so ist festzustellen, dass die Transformations- und Entzerrungswerkzeuge von I/RAS C den größeren Funktionsumfang und die komfortableren Bedienungsmöglichkeiten besitzen. Jedoch zeigte sich an den Voruntersuchungen zur Entzerrung am regelmäßigen Gitter, dass das nur in I/RAS C enthaltene Modell für eine Entzerrung von Karten nicht unbedingt das geeignete ist.

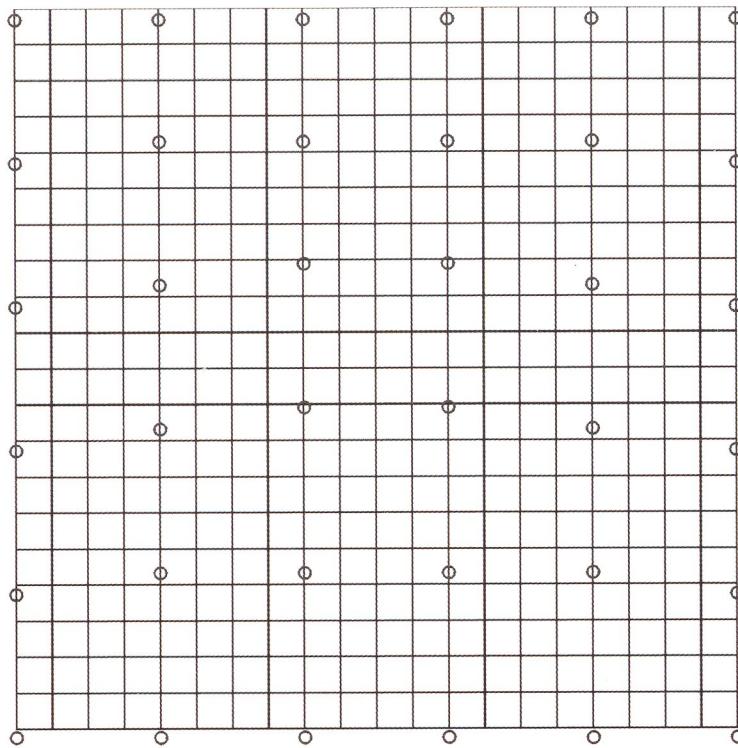


Abb. 7: Transformation mit Modell „Affin“

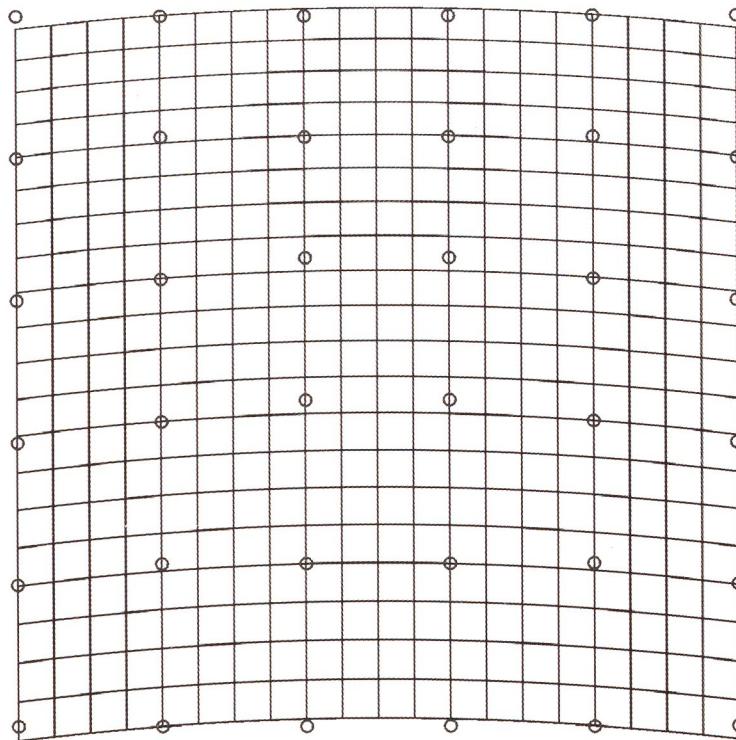


Abb. 8: Entzerrung mit Modell „Polynom 3. Ordnung“

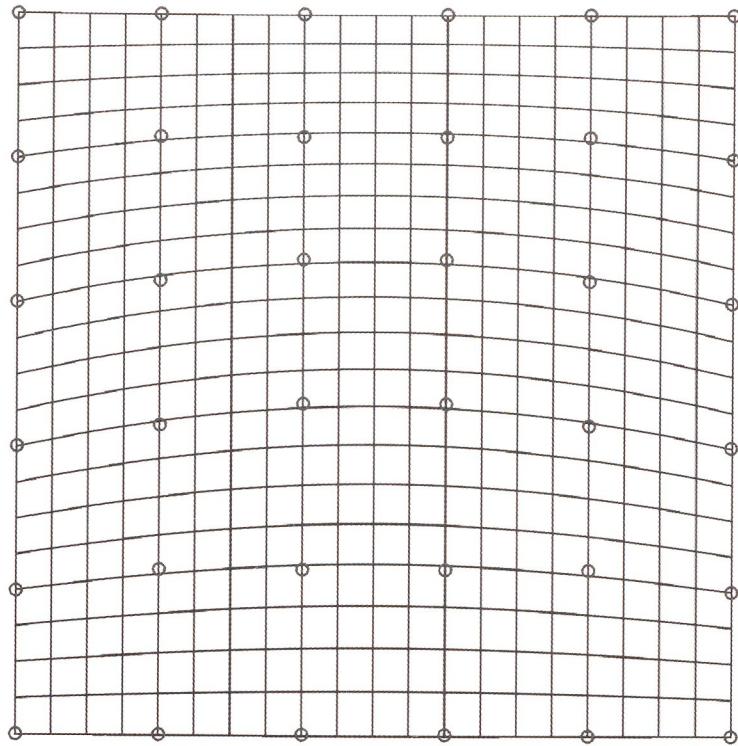


Abb. 9: Entzerrung mit Modell „Polynom 5. Ordnung“

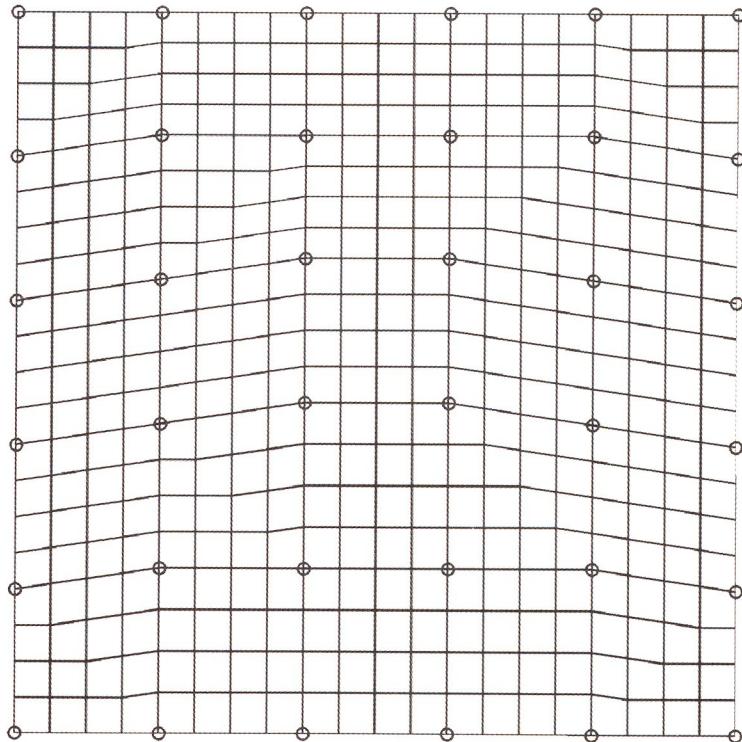


Abb. 10: Entzerrung mit Modell „maschenweise Affintransformation“

Zudem ist der Arbeitsablauf bei der Fortführung momentan auf I/RAS B ausgerichtet. Aufgrund dieser Fakten sind die Entzerrungswerzeuge von I/RAS B zu bevorzugen.

12.2 Untersuchungen zur Entzerrung der Rasterdaten der Alpenvereinskarten

Um die Auswirkungen einer lokalen Entzerrung auf das Erscheinungsbild der Alpenvereinskarten zu untersuchen, wurde als Testgebiet ein etwa 12 km^2 großer Ausschnitt des Kartenblatts „Allgäuer–Lechtaler Alpen – West“ festgelegt. Dieser enthält großflächig Felszeichnung in den Kammlagen um Oefner Spitze, Krottenkopf, March Spitz und Ilfen Spitze.

12.2.1 Vorgehensweise bei der Entzerrung

Im oben genannten Testgebiet konnten 56 *Passpunkte* für die Entzerrung verwendet werden. Diese Punkte wurden bereits für die Genauigkeitsanalyse als identische Punkte erfasst. Um eine Entzerrung für die Rasterdaten in Kartenkoordinaten zu ermöglichen, mussten die in UTM-Koordinaten vorliegenden Passpunkte in Kartenkoordinaten transformiert werden. Da bereits bei der Genauigkeitsanalyse Transformationsparameter zwischen Kartenkoordinaten und UTM-Koordinaten ermittelt worden waren, konnte hierbei eine Affintransformation mit den entsprechenden Parametern angewendet werden. Die somit in Kartenkoordinaten vorliegenden Soll-Lagen der identischen Punkte wurden mit jeweiliger Punktnummer in das CAD-Programm MicroStation eingelesen.

Für die hier genannten Untersuchungen zur Entzerrung wurden die Entzerrungsmodelle auf Basis von Polynomen erster bis fünfter Ordnung verwendet. Wie aus den Voruntersuchungen mit dem regelmäßigen quadratischen Gitter bekannt, wird mit steigender Ordnung des Entzerrungsmodells ein optimaleres Ergebnis in Bezug auf die Minimierung der Residuen erhalten. Ob dieses Optimum auch für das Erscheinungsbild der Alpenvereinskarte gilt, sollte für das Testgebiet überprüft werden.

Nach Zuordnung von Soll- und Ist-Lage für jeden der 56 identischen Punkte im Testgebiet wurde diese Information als Koordinaten-Datei abgespeichert, damit diese stets verfügbar war. Als Begrenzungslinie für die Entzerrung wurde ein Rechteck gewählt, welches das Testgebiet umfasst. Die Entzerrung wurde für alle Layer berechnet.

12.2.2 Ergebnisse und Wirkungsweise der Entzerrung

Die für das Testgebiet erhaltenen Ergebnisse bestätigen folgende nach der Theorie geltende Gesetzmäßigkeit: Je höher die Ordnung des Entzerrungsmodells, desto geringer die Residuen nach der Transformation (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 13: Mittlere Beträge der Klaffungsvektoren in Abhängigkeit vom Entzerrungsmodell in I/RAS B

| Entzerrungsmodell | Betrag der Klaffungsvektoren | |
|-------------------|------------------------------|-------------------|
| | in der Natur [m] | in der Karte [mm] |
| Affin | 24,5 | 0,98 |
| 2. Ordnung | 22,2 | 0,89 |
| 3. Ordnung | 20,8 | 0,83 |
| 4. Ordnung | 19,0 | 0,76 |
| 5. Ordnung | 17,6 | 0,70 |

Der mittlere Klaffungsvektor des Modells „Affin“ entspricht etwa dem bei der Genauigkeitsanalyse mittels geodätischer Affintransformation ermittelten Wert für das Testgebiet (vgl. Tabelle 7).

Von den numerischen Ergebnissen der Entzerrung lassen sich folgende Grundsätze ableiten:

- Bei Entzerrungsmodellen höherer Ordnung sollte eine Extrapolation vermieden werden, da bei höheren Ordnungen die funktionale Festlegung nur innerhalb des Punkthaufens stabil bleibt und außerhalb des Punkthaufens ein größeres Ausschwingungsverhalten auftritt als bei niedrigeren Ordnungen.
- Andererseits sind Entzerrungsmodelle möglichst hoher Ordnung zu bevorzugen, da mit steigender Ordnung die Klaffung zwischen Soll- und Ist-Punkt minimiert wird.
- Die Passpunkte sollten möglichst gleichmäßig über das zu entzerrende Gebiet verteilt sein, da eine Anhäufung von Punkten zu einer lokal stärkeren Gewichtung, und damit zu einer stellenweise übermäßigen Deformation des Kartenbildes führen kann.
- Einzelne große Klaffungsbeträge sollten bei der lokalen Entzerrung nur dann berücksichtigt werden, wenn diese durch in der Nähe liegende Punkte, die möglichst aus einer anderen Passpunktart stammen, bestätigt werden können. Dabei sollte auch eine weitgehende Übereinstimmung in den Richtungen der Klaffungsvektoren vorliegen.
- Bei gebietsweise großen Klaffungen sollte die Punktdichte möglichst hoch, also die Dreiecksvermaschung bei der lokalen Entzerrung möglichst eng sein. Dies gilt vor allem auch am Rand solcher Gebiete, also im Übergangsbereich von kleineren Klaffungen hin zu größeren.
- Eine höhere Punktdichte verbessert generell das Entzerrungsergebnis, ist jedoch in Bezug auf die Wirkungsweise der Entzerrungsmodelle nicht unbedingt notwendig.

Neben den numerischen Ergebnissen der Entzerrungsmodelle sind vor allem ihre Auswirkungen auf den Karteninhalt von Interesse. Die entzerrten Rasterdaten zeigen folgendes Verhalten:

- Linien werden gut reproduziert und scharf wiedergegeben. Dabei tritt keine Brechung von im Original geraden Linien auf.
- Schriften bleiben deutlich lesbar erhalten; es tritt jedoch eine Verkippung aus der Horizontalen, eine Verbiegung und eine Stauchung bzw. Dehnung auf.
- Der Kartenrand erfährt ebenfalls eine Verformung.

Für die Überarbeitung des Kartenbildes nach der Entzerrung ergeben sich somit folgende Konsequenzen:

- Die Felszeichnung wird in ihrer Charakteristik und ihrer feinen Strichstärke nicht beeinträchtigt. Eine Nachbearbeitung der Felszeichnung ist demnach nicht notwendig.
- Da die Schriften nach der Entzerrung kein einheitliches und optisch korrektes Erscheinungsbild mehr aufweisen, müssen sie einer Nachbearbeitung unterzogen werden. Dies bedeutet eine Neuerstellung für die meisten Schriften. Wenn man in Betracht zieht, dass dabei stets auch eine Freistellung notwendig ist, entsteht ein größerer Aufwand.
- Der verformte Kartenrand muss geradlinig neu erstellt werden. Fehlende Geländestücke müssen ergänzt oder der neue Kartenrand so platziert werden, dass keine Ergänzung notwendig ist.

13. Zusammenfassung

13.1 Ergebnisse

13.1.1 Lokale und globale Widersprüche

Blickt man auf die Vorüberlegungen zurück, so lässt sich Folgendes feststellen: Die gewählten Referenzdatenbestände des Bayerischen Landesvermessungsamtes, des Österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen und des Istituto Geografico Militare waren im Wesentlichen brauchbar. Durch deren hohen Detaillierungsgrad konnte eine ausreichende Anzahl von homologen Punkten ausfindig gemacht werden. Die alleinige Verwendung homologer Punkte, die nur durch Lageinformation festgelegt sind, wäre – wie erwartet – in Hinblick auf Anzahl und räumliche Verteilung nicht zufriedenstellend gewesen. Der Einbezug zusätzlicher Punkte, die durch Höheninformation ggf. in Verbindung mit Lageinformation definiert sind, hat sich als zweckmäßig erwiesen.

Die Punktgenauigkeiten der untersuchten Alpenvereinskarten sind wesentlich genauer als erwartet: Für die auf terrestrisch-photogrammetrischer Aufnahme beruhenden Alpenvereinskarten „Karwendelgebirge – West“ und „Zillertaler Alpen – West“ wurde eine Genauigkeit von 20 m – entsprechend 0,8 mm in der Karte – festgestellt, für die auf Messtischaufnahme basierende Alpenvereinskarte „Allgäuer–Lechtaler Alpen – West“ eine Genauigkeit von 30 m, entsprechend

1,2 mm in der Karte. Die Untersuchungen zeigen, dass in den Alpenvereinskarten minimale lokale Widersprüche auftreten, demnach also eine hohe Nachbarschaftsgenauigkeit vorliegt.

Globale Widersprüche waren lediglich in der Karte „Zillertaler Alpen – West“ nachweisbar: Hier liegt eine relative Ost-West-Verschiebung des italienischen Gebiets gegenüber dem österreichischen Gebiet von etwa 100 m vor. Die ermittelten globalen Widersprüche treten an der Ländergrenze auf, da in den beteiligten Ländern zum Zeitpunkt der Uraufnahme unterschiedliche geodätische Referenzsysteme vorlagen. Die Alpenvereinskarten weisen somit eine hohe Homogenität innerhalb der Ländergrenzen auf. Eine Abgrenzung kleinerer homogener Teilbereiche, die von den einzelnen Aufnahmestandpunkten herrührt, erübrigt sich nicht zuletzt aufgrund der minimalen lokalen Widersprüche und der dadurch bedingten hohen Nachbarschaftsgenauigkeit.

13.1.2 Georeferenzierung

Aufgrund der Untersuchungen zur Georefenz der Alpenvereinskarten ist anzunehmen, dass die Alpenvereinskarten nach dem geographischen Gitternetz genordet sind. Nach Bestimmung der Blatteckenwerte der Alpenvereinskarten in einem internationalen Bezugssystem (UTM-System bezüglich WGS 84) kann über Einprojektion des Gitters dieses Bezugssystems die neue Georeferenz hergestellt werden ohne die Karte selbst zu verändern.

13.1.3 Untersuchungen zur Entzerrung

Die in den Untersuchungen getesteten Entzerrungswerzeuge der Rasterbearbeitungssoftware I/RAS B und I/RAS C sind in Hinblick auf Wirkungsweise, Funktionsumfang und Bedienungsfreundlichkeit mit verschiedenen Vor- und Nachteilen behaftet. Ausschlaggebend für die Verwendung sollte jedoch das geeignete Entzerrungsmodell sein. Nach Untersuchung der beiden in Frage kommenden Modelltypen zeigte sich, dass für die Kartographik die Vorteile bei den Entzerrungsmodellen „Polynom höherer Ordnung“ gegenüber dem Modell „maschenweise Affintransformation“ überwiegen, solange das zu entzerrende Gebiet bis an die Ränder mit Passpunkten abgedeckt werden kann.

Die Entzerrungsmodelle „Polynom höherer Ordnung“ haben gegenüber dem Modell „maschenweise Affintransformation“ den Hauptvorteil, dass durch die Entzerrung keine ungewollten Knicke an vormals geraden Linien entstehen können. Das Erscheinungsbild der Alpenvereinskarten, insbesondere das Aussehen der Höhenlinien und der Felszeichnung, wird in seiner Charakteristik kaum verändert. Eine Nachbearbeitung der Schriften und des Kartenrahmens nach der Entzerrung ist jedoch unvermeidlich.

13.2 Schlussfolgerungen

Als wesentliche Resultate der Untersuchungen müssen die hohe Punktgenauigkeit und die hohe Homogenität der Alpenvereinskarten angesehen werden. Eine lokale Entzerrung des Kartenmaterials ist somit nicht notwendig. Globale Widersprüche können an Ländergrenzen auftreten. Die Beseitigung derartiger großräumiger Verschiebungen ist anzustreben.

Für die Weiterverwendung des Kartenmaterials des Deutschen Alpenvereins ist Folgendes zu empfehlen: Da keine lokale Entzerrung der Alpenvereinskarten erforderlich ist und nur ein Teil der Karten zwei Länder überdeckt, kann davon ausgegangen werden, dass bei den meisten Karten die Ermittlung der Georeferenz über eine geringe Anzahl von homologen Punkten möglich ist. Nach Ermittlung der Blatteckenwerte dieser Karten kann das UTM-Gitter einprojiziert werden. Die Karten erhalten somit die Tauglichkeit für eine absolute Positionierung.

Alpenvereinskarten, die sich über mehr als ein Land erstrecken und denen unterschiedliche Vermessungsgrundlagen zugrunde liegen, sollten jedoch vor der Georeferenzierung auf mögliche globale Widersprüche untersucht werden. Bereits ein graphischer Vergleich konnte den Alpenvereinskartographen bisher bei ihren Fortführungsarbeiten Aufschluss über Verschiebungen und Verdrehungen geben. Wurden globale Widersprüche festgestellt, so ist vor der Georeferenzierung eine Entzerrung über homologe Punkte durchzuführen, welche das zu entzerrende Gebiet möglichst umfassend abdecken.

14. Literatur

- ARNBERGER, E. (1970): Die Kartographie im Alpenverein. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, H. 22, Innsbruck, 253 S.
- BIERSACK, H. (1934): Begleitworte zum Kartenwerk der Zillertaler Alpen. Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, S. 1 - 11.
- BRUNNER, K. (2001): Die Kartographie im Deutschen Alpenverein. Kartographische Nachrichten, 51. Jhrg., H. 1, Bonn, S. 17 - 22.
- EHLERT, D. (1991): Differentielle Verschiebungen und Drehstreckungen im dreidimensionalen Raum, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Nr. 295, München, 60 S.
- FINSTERWALDER, Ri. (Hrsg.) (1935): Alpenvereinskartographie und die ihr dienenden Methoden. Sammlung Wichmann, Bd. 3, Berlin, 81 S.
- FINSTERWALDER, Ri. (1939): Photogrammetrie. Berlin, S. 136 ff.

- FINSTERWALDER, Rü. (1994): Unabgerissene Tradition. 25 Jahre Kartographie beim Deutschen Alpenverein. In: LANDES, E. und M. (Hrsg.): 125 Jahre Deutscher Alpenverein, München, S. 83-91.
- FISCHER, J. (2001): Digitale Aktualisierung der Alpenvereinskarten. Kartographische Nachrichten, 51. Jhrg., H. 1. S. 22-26.
- HANKEMEIER, H. (1998): Satellitenpositionierungsdienst SAPOS. Zeitschrift für Vermessungswesen, 123. Jhrg., H. 5, S. 149-156.
- IHDE, J., SCHOCH, H., STEINICH, L. (1995 a): Beziehungen zwischen den geodätischen Bezugssystemen Datum Rauenberg, ED 50 und System 42. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Nr. 298, München, 86 S.
- IHDE, J., SCHOCH, H., STEINICH, L. (1995 b): Datumstransformation zwischen den Bezugssystemen ETRF/WGS, DHDN und System 42, Zeitschrift für Vermessungswesen, 120. Jhrg., H. 4, S. 192-196.
- PENZKOFER, M., BRUNNER, K., FISCHER, J., REINHARDT, W. (2001): Untersuchungen zur Genauigkeitsanalyse von Alpenvereinskarten. Zeitschrift für Vermessungswesen, 126. Jhrg., H. 1, S. 5-10.
- SCHIRMER, H. (1996): Die Kartographie des Alpenvereins. Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Band 9, Wien, S. 88 ff.
- SCHUHR, P. (1997): Konforme Datumstransformation zwischen deutschen Gauß-Krüger- und UTM-Koordinaten. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 104. Jhrg., H. 3, S. 106-112.

Internetadressen (Stand November 2001):

Bayerisches Landesvermessungsamt:
www.bayern.de/vermessung

NIMA (National Imagery and Mapping Agency der USA):
www.nima.mil

SAPOS:
www.sapos.de

**DIE ALPENVEREINSKARTE
ALS GRUNDLAGE FÜR
GEOGRAPHISCHE
INFORMATIONSSYSTEME**

Armin Heller

1. Einleitung

Seit dem Zusammenschluss des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins im Jahre 1874 war es diesem stets ein Anliegen, neben der touristischen Erschließung der Ostalpen auch die Verbindung von Wissenschaft und Alpinismus im Alpenraum vereinsmäßig zu fördern. Im gesamten Schrifttum des Alpenvereins spielte daher von Anfang an auch die Karte eine sehr wichtige Rolle. Sie sollte aber nicht nur dem Bergsteiger eine möglichst genaue Orientierungshilfe sein, sondern darüber hinaus auch als topographische Grundlage für wissenschaftliche Arbeiten und geographische Interpretationen dienen. Das heutige Angebot an Alpenvereinskarten ist damit das Ergebnis einer über 100 jährigen Entwicklung der Hochgebirgskartographie im Ostalpenraum. Zahlreiche unterschiedliche Aufnahmeverfahren haben dabei zu den Karten geführt, die noch heute wegen ihres hohen Detailinformationsgehaltes nicht nur von Alpinisten zur Orientierung geschätzt werden, sondern auch fast immer als Kartiergrundlage für wissenschaftliche Datenerhebungen Verwendung finden. Für eine detaillierte Darstellung der Entwicklung der Alpenvereinskartographie sei auf ARNBERGER (1970) und GARTNER (1989) verwiesen.

Die Alpenvereinskartographie ist heute bestrebt, den existierenden Kartenbestand im alpinen Bereich aktuell zu halten – Neuerstellungen hingegen sind zur Zeit nicht vorgesehen. Bei den neueren Kartenfortführungen hat sich allerdings gezeigt, dass zum Teil geometrische Abweichungen zu den amtlichen Kartenwerken existieren, die sogar innerhalb eines Kartenblattes stark variieren können. Auch wird auf den Kartenblättern weder eine kartographische *Projektion* noch ein *geodätisches Datum* angegeben. Für die bisherige Nutzung der Karten, für Orientierung im Gelände und Verwendung als Kartiergrundlage, bedeutete dies auch keinerlei Einschränkungen. Mit der heute allgemeinen Verfügbarkeit von *GPS*-Daten (Global Positioning System) und deren Kopplung mit Datenbeständen eines *GIS* (Geographisches Informationssystem) haben sich die Anforderungen allerdings stark geändert. Die exakte *Georeferenzierung* der Alpenvereinskarten bezüglich eines internationalen räumlichen Bezugssystems ist heute die uneingeschränkte Voraussetzung dafür, dass dieses Kartenwerk auch im digitalen Zeitalter seinen Fortbestand findet. Die folgende Studie soll zeigen, inwieweit dieser Anspruch erfüllt werden kann. Am Beispiel der Alpenvereinskarte Nr. 31/2, Stubaier Alpen – Sellrain, werden verschiedene Methoden der Georeferenzierung durchgeführt und qualitativ ausgewertet. Der Schwerpunkt der Ausführungen liegt allerdings nicht nur bei der generellen kartographischen Transformierbarkeit der Alpenvereinskarte, sondern geht vielmehr der Frage nach, inwieweit digital erfasste Kartierungen auf Grundlage der Alpenvereinskarte mit den digitalen Datenbeständen der amtlichen Kartenwerke kombiniert werden können. Gelingt dies mit den entsprechenden Genauigkeitsanforderungen, so wäre der ursprüngliche Anspruch der Alpenvereinskartographie auch heute noch bei der satellitengesteuerten Orientierung im Gelände und bei der nun üblichen digitalen Verwendung wissenschaftlicher Kartierungen weiterhin erfüllt. Digital konvertierte Daten auf

der Grundlage einer Alpenvereinskarte wären dann in ein Geographisches Informationssystem integrierbar. Die Vorteile im Einzelnen:

- Das amtliche Kartenwerk des österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen liegt im Maßstab 1:50 000 vor. Die Österreichische Karte im Maßstab 1:25 000 ist eine rein photographische Vergrößerung der Karte 1:50 000 und hat deshalb keinen höheren Informationsgehalt. Aufgrund des erhöhten Detailinformationsgehaltes der Alpenvereinskarten im Maßstab 1:25 000 können digital konvertierte Kartierungen mit den amtlichen Datenbeständen überlagert und kombiniert werden. Dadurch ergibt sich eine enorme Nutzungssteigerung in allen Bereichen der geographischen Informationsverarbeitung.
- Die heute üblichen Positionsbestimmungen mittels GPS beruhen auf dem internationalen Bezugssystem *WGS84* (World Geodetic System 1984) und verwenden als kartographische Projektion das weltweite *UTM-System* (Universal Transverse Mercator). Damit können per GPS ermittelte Positionen ohne aufwendige Transformationen sofort auf eine Karte, auch digital, übertragen werden. Das österreichische zivile Kartenwerk wird derzeit im Rahmen des normalen Fortführungszyklus vom *Bundesmeldenetz*, einer *Gauß-Krüger Projektion* mit dem Bezugsmeridian Ferro und dem geodätischen Datum *MG1* (Militärgeographisches Institut), auf UTM und WGS 84 umgestellt. Nach Auskunft des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen werden die ersten umgestellten Karten im Oktober 2001 erscheinen, das letzte Blatt dann voraussichtlich im Jahre 2009.
- Insbesondere durch die digitale Verfügbarkeit und damit auch durch die schnelleren Vervielfältigungsmöglichkeiten von Karteninformationen richtet sich die allgemeine Diskussion über Copyright und Nutzungsrechte digitaler Geodaten vermehrt auch an digitale Folgeprodukte. Bei dieser Diskussion ist natürlich zu berücksichtigen, dass in Österreich neben dem Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen auch der Alpenverein, zumindest in weiten Teilen der Ostalpen, ebenso über eine eigene Landesaufnahme und damit auch über die entsprechenden Vervielfältigungsrechte verfügt.

2. Vorgehensweise

Für die folgenden Untersuchungen wurden vom Österreichischen Alpenverein, Abteilung Kartographie, in Innsbruck die *gescannten* Farbauszüge der Alpenvereinskarte Nr. 31/2, Stubaier Alpen – Sellrain, von der Tiroler Landesregierung, Abteilung Raumordnung und Statistik (Tiris), die digitalen Grundlagen der Österreichischen Karte 1:50 000 Blatt 146 – Oetz und Blatt 147 – Axams sowie vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Vermessungsamt Innsbruck, die numerischen Koordinaten aller trigonometrisch vermessenen Punkte innerhalb der

beiden Kartenblätter ÖK 50 Blatt 146 – Oetz und Blatt 147 – Axams zur Verfügung gestellt. Allen Einrichtungen sei an dieser Stelle hierfür herzlich gedankt.

Zunächst wurden die beiden Kartenblätter der Österreichischen Karte 1:50 000 (ÖK 50) kombiniert und anschließend auf den Ausschnitt der Alpenvereinskarte reduziert. Die trigonometrisch vermessenen Punkte wurden in ein digitales GIS-Format konvertiert und anschließend mit der ÖK 50 überlagert. Beide Datensätze liegen im Bundesmeldenetz M 28 vor. Die eindeutig identifizierbaren trigonometrischen Punkte zeigten jedoch zum Teil erhebliche Abweichungen von den entsprechenden Signaturen auf der ÖK 50, so dass diese *Rasterdaten* mit entsprechenden Gitternetzpunkten nochmals georeferenziert werden mussten. Auf diesen Datengrundlagen wurden nun in verschiedenen Testgebieten die drei elementaren Datentypen eines Vektor-GIS digitalisiert: Punkte (Trigonometrische Punkte, Berggipfel, Brücken, etc.), Linien (Flüsse, Bäche, Straßen, Höhenlinien, Lifte, Hochspannungsleitungen, etc.) und Polygone (Seen, Stauseen).

Mit der Alpenvereinskarte wurden dann die verschiedensten *Transformationen* durchgeführt und mit den vektorisierten Testgebieten überlagert. Damit kann die Qualität der durchgeföhrten Transformationen bzw. die Näherung an die ÖK 50 beurteilt werden.

Eine Transformation zwischen Bezugssystemen und damit auch die Umrechnung zwischen verschiedenen kartographischen Projektionen ist mit Geographischen Informationssystemen stets möglich, wenn die Ausgangsprojektion und die Zielprojektion bekannt sind. Im vorliegenden Fall ist aber nur das Referenzsystem der Zielprojektion bekannt, nämlich das Österreichische Bundesmeldenetz, Bezugsmeridian M 28. Damit muss die Alpenvereinskarte zunächst mit Kontrollpunkten auf das Österreichische Bundesmeldenetz transformiert werden. Gelingt dies, sind alle weiteren Projektionen wie etwa das bereits erwähnte UTM-System problemlos möglich.

Die Georeferenzierung der Alpenvereinskarte wurde mit dem GIS-Softwareprodukt TNTmips (<http://www.microimages.com>) durchgeführt, da dieses Softwareprodukt die verschiedensten Transformationsmöglichkeiten anbietet und zudem eine Vielzahl an technischen Möglichkeiten bereitstellt, die bei den anderen zur Verfügung stehenden Softwareprodukten wie ArcView, ArcInfo, Spans, Idrisi, MapInfo, Didger oder PCI nicht entsprechend implementiert sind.

3. Maßstabsüberlegungen

Die Österreichische Karte ÖK 50 (Maßstab 1:50 000) wurde mit einer Auflösung von 508 dpi gescannt. Damit entspricht ein Pixel auf der Karte 0,05 mm und in der Natur 2,5 m. Die Liniensignatur eines Fahrweges mit einer Strichstärke von 0,2 mm entspricht damit 10 m Breite und wird mit 4 Pixeln repräsentiert. Eine

in der Natur etwa 6 m breite Landesstraße (Straße zweiter Ordnung) hat auf Grund der Generalisierung eine umgerechnete Breite von etwa 40 m.

Die Alpenvereinskarte (Maßstab 1:25 000) wurde mit 1200 dpi gescannt. Das ergibt eine Auflösung je Pixel von etwa 0,5 m in der Natur. Für die vorliegende Studie wurden die Rasterdaten auf eine Pixelgröße von 1,25 m umgerechnet. Eine Strichstärke von 0,2 mm entspricht hier nur 5 m, wird aber ebenso mit 4 Pixeln repräsentiert. Damit werden die beiden Datensätze technisch besser vergleichbar.

Die trigonometrisch vermessenen Punkte liegen laut Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich vor. Leider findet nur ein Teil dieser Punkte Verwendung, da viele auf der ÖK 50 gar nicht eingezeichnet sind bzw. nicht entschieden werden kann, ob das entsprechende Karten-Symbol mit der jeweiligen Vermessungsmauer übereinstimmt. Es wurden deshalb nur diejenigen trigonometrischen Punkte verwendet, die eindeutig auf der ÖK 50 bestimmt werden können bzw. deren Lagegenauigkeit unter 50 m liegt.

Von den insgesamt 216 trigonometrisch vermessenen Punkten können nur 52 auf der ÖK 50 identifiziert werden. Vergleicht man diese mit den entsprechenden Punkten, die auf Grundlage der ÖK 50 digitalisiert wurden, zunächst mit der mitgelieferten Georeferenzierung und dann mit der selbst erstellten Georeferenzierung, so ergeben sich für die euklidischen Distanzen (Luftliniendistanz) folgende statistische Kennwerte in Metern (Tabelle 1).

Damit zeigt sich, dass die eigene Georeferenzierung der ÖK 50 im Vergleich zu den trigonometrisch vermessenen Punkten um bis zu 10 m (4 Pixel) besser liegt. Das entspricht auf der Karte der Breite eines Fahrweges (Strichstärke 0,2 mm). In der Folge beziehen sich alle weiteren Ausführungen auf diese verbesserte Georeferenzierung der ÖK 50.

Tabelle 1: Statistische Kennwerte der beiden Georeferenzierungen der ÖK 50 in Meter

| | Orginal | Eigene Georeferenzierung | Differenz |
|--------------------|---------|--------------------------|-----------|
| Summe [m] | 859,05 | 715,66 | 143,39 |
| Mittelwert | 16,52 | 13,76 | 2,76 |
| Größter Wert | 57,86 | 46,87 | 10,99 |
| Kleinster Wert | 2,39 | 1,52 | 0,85 |
| Spannweite | 55,47 | 45,35 | 10,12 |
| Varianz | 140,52 | 115,66 | 24,86 |
| Standardabweichung | 11,86 | 10,75 | 1,11 |

4. Transformationen

Im folgenden werden die charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen Transformationen kurz erläutert und dann die entsprechenden Ergebnisse diskutiert. Ziel dabei ist es, jeden Punkt $P(x, y)$, bestehend aus den Koordinaten (x, y) des Originals, hier die Koordinaten des gescannten Bildes der Alpenvereinskarte, in das transformierte System $P'(x', y')$, hier die entsprechenden Koordinaten der ÖK 50 im Bundesmeldenetzes M 28, umzurechnen. Um die jeweilige Abbildungsvorschrift $P \rightarrow P'$ bestimmen zu können, müssen mit Hilfe von sich entsprechenden Punkten in beiden Systemen die jeweiligen Parameter der Abbildungsvorschrit abgeleitet werden. Sind nach dieser Zuordnung die Transformationsgleichungen vollständig bestimmt, können alle Punkte umgerechnet werden. Detaillierte Informationen zu den einzelnen Transformationen findet man u.a. in den Handbüchern der entsprechenden Programme.

Mit Hilfe des Moduls „Georeference“ wurde zunächst die entsprechende Anzahl an *Passpunkten* ermittelt. Dabei wurde versucht, die Residuen bzw. den sogenannten RMS-Error (Root Mean Square Error), eine statistische Abschätzung über die Qualität der Passpunkte, möglichst gering zu halten. Bei der reinen Georeferenzierung bleiben die Attributwerte der Pixel unverändert. Sollen diese ebenso umgerechnet werden, müssen mit den entsprechenden Passpunkten bzw. mit den entsprechenden *Transformationsparametern* anschließend die Pixelwerte neu berechnet werden („Resampling“).

Da klassifizierte Attributwerte vorliegen, kommt als *Interpolationsmethode* nur die „Nearest Neighbor“ Methode in Frage. Dabei werden zunächst die beiden Gitternetze des Originals und der Transformation rein geometrisch berechnet. Diese sind dann normalerweise nicht deckungsgleich (siehe Abb. 1). Die Attributwerte des neuen Rasters müssen nun aus denen des Originals bestimmt werden. Bei der „Nearest Neighbor“ Methode bekommt das neue Pixel den Wert, der dem des Originals am nächsten kommt bzw. in aller Regel den größten Flächenanteil besitzt.

Nach dieser Interpolation ist die Georeferenzierung zwar deutlich verbessert, das Kartenbild wird aber zwangsläufig etwas verzerrt bzw. unscharf. Diese Effekte fallen am stärksten bei der Beschriftung auf. Für die digitale Übernahme von Kartierungen in ein Geographisches Informationssystem sind diese Folgeerscheinungen aber ohne Bedeutung. Eine Korrektur dieser Verzerrungen mittels geeigneter Filtertechniken wäre denkbar.

4.1 Die affine Transformation

Die affine Transformation, auch als „Linear Anisotropic“ bezeichnet, kann sich aus den elementaren Operationen Translation, Rotation, Skalierung und einer Scherung zusammensetzen. Parallel Linien bleiben dabei parallel. Die affine

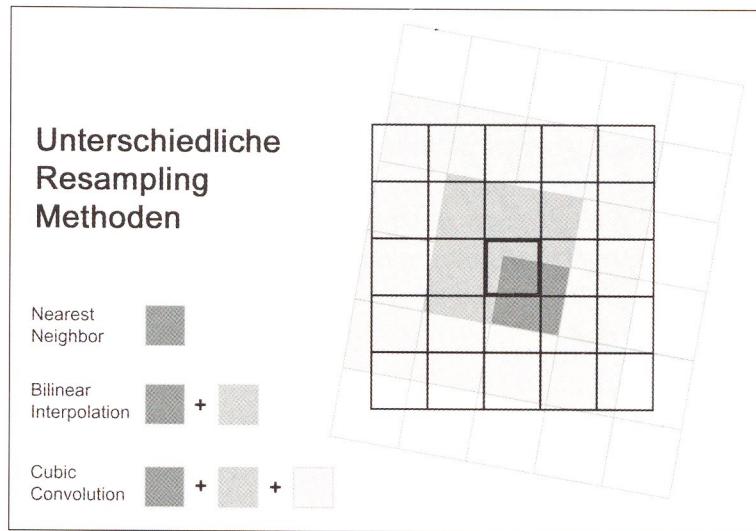


Abb. 1: Unterschiedliche Resampling Methoden (nach: MICROIMAGES, 2000 a)

Transformation benötigt mindestens drei Passpunkte bzw. sechs Koordinaten, um die Parameter $a_{i,j}$ der Transformationsgleichungen bestimmen zu können:

$$\begin{aligned}x' &= a_{10} + a_{11}x + a_{12}y \\y' &= a_{20} + a_{21}x + a_{22}y\end{aligned}$$

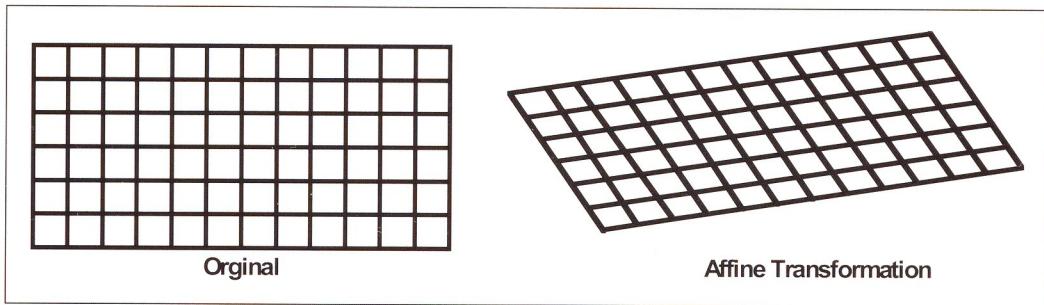


Abb. 2: Die affine Transformation (nach: GOLDEN SOFTWARE, 2000)

Diese Abbildung ist geeignet, Daten zwischen zwei kartesischen Systemen zu transformieren, die sich durch Verschiebung, Drehung, Skalierungen, Scherung oder Hintereinanderausführung dieser Operationen voneinander unterscheiden. Typische Beispiele hierfür sind die Transformation von Tischkoordinaten eines Digitalisiertablettes auf das System der entsprechenden Karte, die *digitalisiert* wurde. Aber auch gescannte Vorlagen können damit so georeferenziert werden, dass die Bildschirmkoordinaten denen der Karte entsprechen. Würde die Alpenvereinskarte im Bundesmeldenetz M28 vorliegen, könnten damit die digitalen Vorlagen auf sehr einfache Weise in das Referenzsystem der ÖK 50 transformiert werden.

4.2 Die planare Transformation

Diese Transformation konvertiert die Daten zwischen zwei nicht parallelen Ebenen. Diese Situation tritt insbesondere dann auf, wenn nicht senkrecht aufgenommene Luftbilder in eine relativ horizontale Ebene abgebildet werden sollen. Die geometrischen Eigenschaften entsprechen der affinen Transformation mit dem Unterschied, dass nur die Linien parallel bleiben, die zu den Schnittgeraden der Ebenen parallel sind. Es werden mindestens vier Passpunkte benötigt.

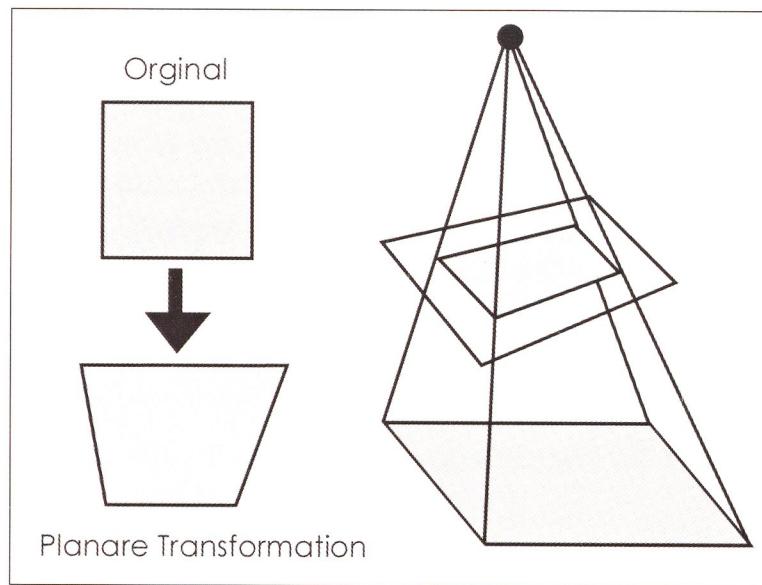


Abb. 3: Die planare Transformation (nach: MICROIMAGES, 2000 a)

4.3 Die bilineare Transformation

Die bilineare Transformation bildet die Ausgangsdaten auf ein unregelmäßiges Viereck ab. Parallele Linien bleiben nicht mehr parallel. Diese Transformation, auch als Transformation 1. Ordnung bezeichnet, benötigt mindestens acht Parameter bzw. vier Passpunkte:

$$\begin{aligned}x' &= a_{10} + a_{11}x + a_{12}y + a_{13}xy \\y' &= a_{20} + a_{21}x + a_{22}y + a_{23}xy\end{aligned}$$

4.4 Polynomiale Transformationen

Polynomiale Transformationen sind für Entzerrungen gedacht, die nichtlineare Störungen aufweisen. Je nach Grad des Polynoms (Ordnung) werden entsprechend

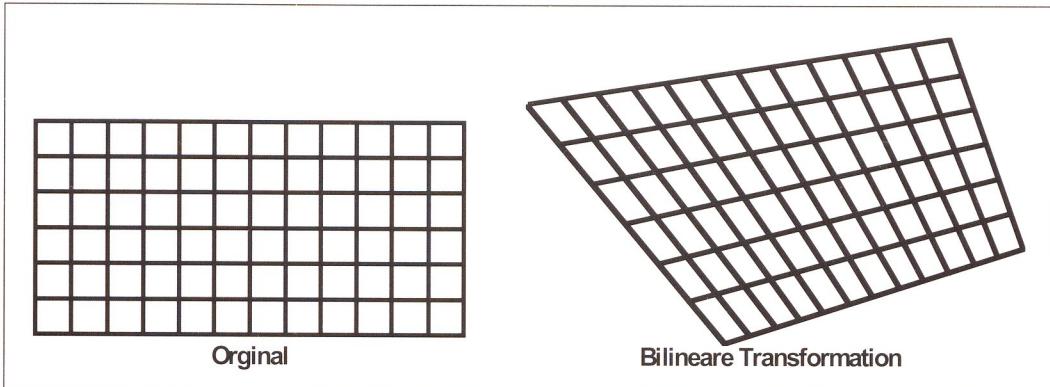


Abb. 4: Die bilineare Transformation (nach: GOLDEN SOFTWARE, 2000)

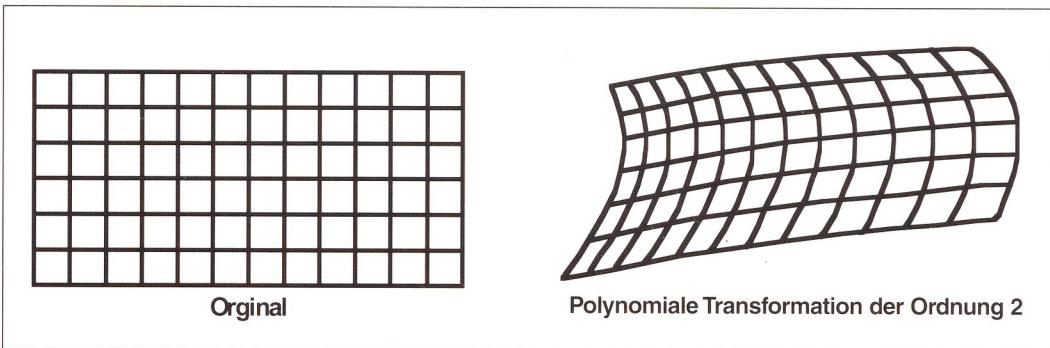


Abb. 5: Transformation der Ordnung 2 (nach: GOLDEN SOFTWARE, 2000)

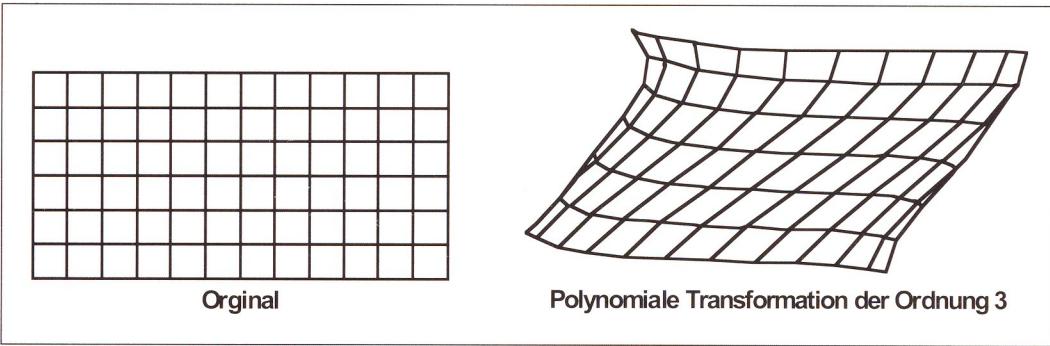


Abb. 6: Transformation der Ordnung 3 (nach: GOLDEN SOFTWARE, 2000)

viele Passpunkte benötigt. Die folgende Transformation 3. Ordnung benötigt 10 Passpunkte bzw. 20 Parameter:

$$\begin{aligned}x' &= a_{10} + a_{11}x + a_{12}y + a_{13}xy + a_{14}x^2 + a_{15}y^2 + a_{16}x^3 + a_{17}x^2y + a_{18}xy^2 + a_{19}y^3 \\y' &= a_{20} + a_{21}x + a_{22}y + a_{23}xy + a_{24}x^2 + a_{25}y^2 + a_{26}x^3 + a_{27}x^2y + a_{28}xy^2 + a_{29}y^3\end{aligned}$$

Transformationen mit einer noch höheren Ordnung (Grad 4, 5 oder 6) neigen allerdings dazu, dass zwischen den Passpunkten, insbesondere in den Ecken, ungewollte Verzerrungen auftreten (siehe Abbildungen 5 und 6).

4.5 Die maschenweise Affintransformation

Während alle bisherigen Transformationen versuchen, eine globale Korrektur durchzuführen, ist es mit der maschenweisen Affintransformation möglich, lokal unterschiedliche Verzerrungen zu korrigieren. Mit allen Passpunkten wird zunächst eine *Delaunay Triangulation* berechnet. Dann wird mit jeder der so entstandenen Dreiecksfacetten eine affine Transformation durchgeführt. Damit wird es möglich, unterschiedliche Bereiche individuell zu transformieren. Die Lage und Anzahl der Passpunkte sind für die Qualität des Ergebnisses entscheidend.

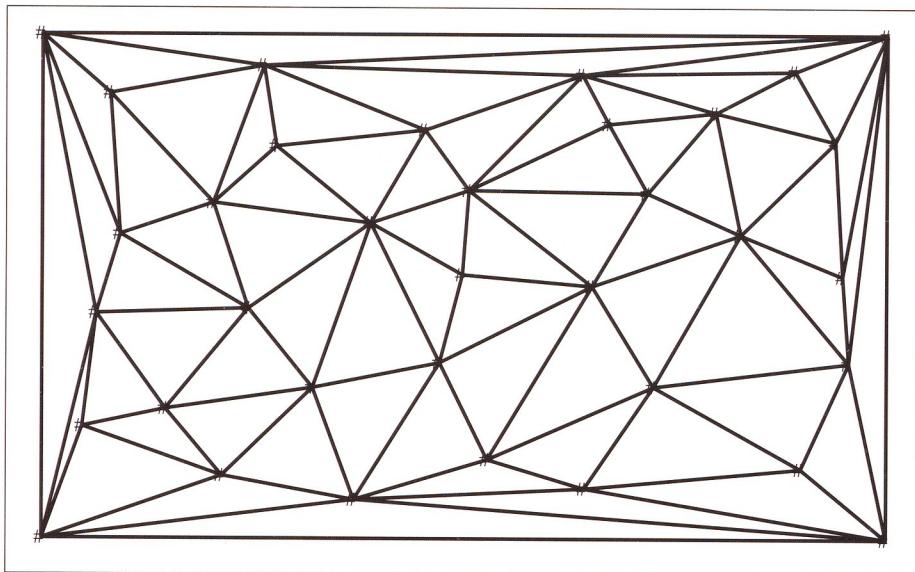


Abb. 7: Maschenweise Affintransformation

5. Ergebnisse

Nach Auskunft der Kartographen des Alpenvereins sind aufgrund der Aufnahmeverfahren die geometrischen Ungenauigkeiten der Alpenvereinskarten innerhalb eines Kartenblattes i. a. nicht homogen. Daraus kann gefolgert werden, dass die maschenweise Affintransformation die geeignetste Methode zur Georeferenzierung von Alpenvereinskarten ist. Im folgenden wird daher das Ergebnis dieser Transformation mit den Ergebnissen anderer Transformationen verglichen. Die Transformation wurde mit insgesamt 735 Passpunkten durchgeführt.

Zunächst wurde der lineare Abstand zwischen den 35 trigonometrisch vermessenen Punkten und den jeweils entsprechenden Punkten auf der transformierten Alpenvereinskarte berechnet. Dabei konnten nur die Punkte berücksichtigt werden, die in beiden Kartenwerken verzeichnet sind:

Tabelle 2: Abstände zu den trigonometrisch vermessenen Punkten in Meter

| | Summe der Abstände [m] | Mittelwert | Größter Wert | Kleinster Wert | Standardabweichung | Anzahl der Punkte mit Abstand < 10 m | Anzahl der Punkte mit Abstand < 5 m |
|-------------------|------------------------|------------|--------------|----------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| ÖK 50 | 402,16 | 11,49 | 31,49 | 1,53 | 6,43 | 16 | 4 |
| Affine Transf. | 517,00 | 14,77 | 53,12 | 1,44 | 10,74 | 13 | 4 |
| Planare Transf. | 702,98 | 20,09 | 57,16 | 5,39 | 15,02 | 9 | 0 |
| Bilineare Transf. | 560,83 | 16,02 | 41,54 | 4,37 | 8,78 | 10 | 1 |
| Polynom Grad 2 | 566,45 | 16,18 | 40,75 | 4,22 | 8,94 | 10 | 2 |
| Polynom Grad 3 | 538,14 | 15,38 | 45,04 | 3,08 | 9,33 | 11 | 2 |
| Polynom Grad 4 | 496,60 | 14,19 | 35,88 | 3,59 | 7,95 | 12 | 2 |
| Polynom Grad 5 | 521,25 | 14,89 | 35,87 | 1,91 | 7,68 | 12 | 1 |
| Polynom Grad 6 | 871,93 | 24,91 | 64,14 | 1,09 | 15,41 | 6 | 2 |
| Maschenw. Affin | 451,63 | 12,90 | 33,86 | 0,77 | 7,54 | 11 | 6 |

Dieser Vergleich kann nur bedingt zur Beurteilung der Transformationen herangezogen werden, da für diese die Referenzpunkte der ÖK 50 betrachtet werden müssen. Die mittlere Abweichung ist jedoch bei der affinen Transformation nur um ca. 3 m und bei der maschenweisen Affintransformation etwa 1,5 m schlechter als die der ÖK 50.

Die Auswertung derselben Abstände in Bezug auf die entsprechenden Punkte der ÖK 50 ergibt folgendes Bild:

Tabelle 3: Abstände zu den Punkten der ÖK 50 in Meter

| | Summe der Abstände [m] | Mittelwert | Größter Wert | Kleinster Wert | Standardabweichung | Anzahl der Punkte mit Abstand < 10 m | Anzahl der Punkte mit Abstand < 5 m |
|-------------------|------------------------|------------|--------------|----------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Affine Transf. | 498,09 | 14,23 | 28,70 | 1,91 | 8,11 | 14 | 6 |
| Planare Transf. | 697,41 | 19,93 | 44,39 | 2,03 | 12,41 | 6 | 3 |
| Bilineare Transf. | 519,57 | 14,84 | 30,64 | 1,35 | 8,11 | 12 | 6 |
| Polynom Grad 2 | 528,91 | 15,11 | 31,35 | 1,67 | 8,30 | 10 | 7 |
| Polynom Grad 3 | 508,72 | 14,53 | 31,65 | 1,67 | 8,47 | 12 | 7 |
| Polynom Grad 4 | 471,00 | 13,46 | 26,03 | 0,59 | 7,66 | 13 | 7 |
| Polynom Grad 5 | 489,04 | 13,97 | 26,03 | 2,02 | 7,01 | 13 | 4 |
| Polynom Grad 6 | 892,18 | 25,49 | 54,27 | 3,03 | 15,36 | 5 | 1 |
| Maschenw. Affin | 178,61 | 5,10 | 32,46 | 0,35 | 6,35 | 32 | 26 |

Von den insgesamt 35 Punkten liegen bei der maschenweisen Affintransformation 32 Punkte in einem Abstand von unter 10 m und noch 26 Punkte unter 5 m. Die 3 Punkte mit einer Abweichung von mehr als 10 m liegen alle im Bereich des Kartenrandes. Damit ist in diesem Bereich vermutlich die Transformation ungenauer, da die Triangulation konstruktionsbedingt nur innerhalb der konvexen Hül-

le der Passpunkte verlässliche Ergebnisse liefert. Bei einer einfachen Affintransformation beträgt die mittlere Lagedifferenz zu den trigonometrisch vermessenen Punkten hingegen etwa das Dreifache! Nur 6 Punkte zeigen eine Abweichung von unter 5 m, 14 Punkte unter 10 m. Die Werte der anderen Projektionen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Aufgrund der Maßstabsüberlegungen (siehe oben) kann ein Lagefehler von weniger als 10 Meter bedenkenlos als sehr gutes Ergebnis gewertet werden.

Zunächst ein Beispiel dafür, wie stark sich unterschiedliche Transformationen auf die Lagegenauigkeit auswirken können. Am Beispiel der Seen nördlich des Ortes Kühthai beträgt die Lagedifferenz zwischen der ÖK 50 und der affintransformierten Karte um bis zu 60 Meter (siehe Abb. 8).

Das Ergebnis der maschenweisen Affintransformation ist hingegen in diesem Bereich mit den Referenzseen der ÖK 50 völlig übereinstimmend (siehe Abb. 9).

In Abb. 10 ist das Ergebnis der Seen im Bereich des Widersberg, östlich von Praxmar, mit der Transformation 4. Ordnung dargestellt. Auch hier liegen die Seen

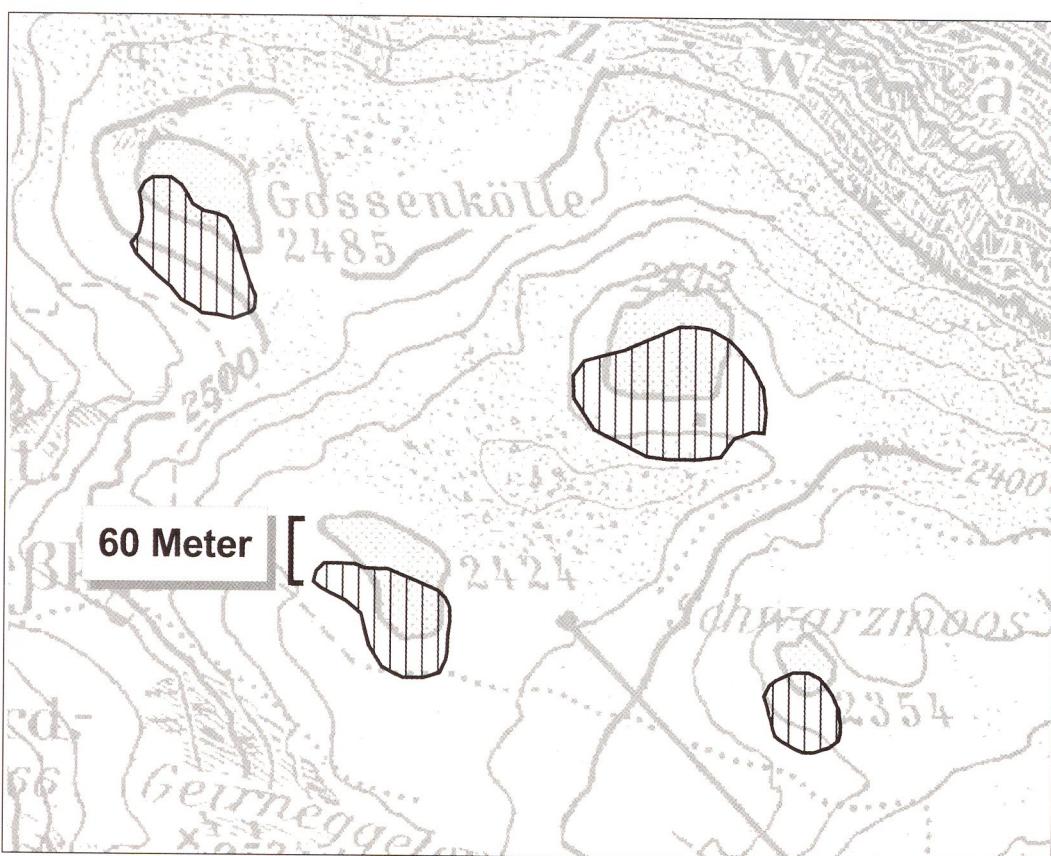


Abb. 8: Affine Transformation im Bereich Gössenkölle:
Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.
Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierte Seen.

der Alpenvereinskarte um bis zu 75 Meter zur ÖK verschoben. Allerdings ist die Verschiebung bereits in diesem kleinen Kartenausschnitt sehr unterschiedlich. So weisen die beiden unteren Seen eine Verschiebung von nur knapp 20 Meter auf.

Wählt man nun die geschätzten Seenmittelpunkte als Passpunkte, so sind mit der maschenweisen Affintransformation kleinräumige Korrekturen möglich – vorausgesetzt, die Seen sind kartographisch korrekt eingezeichnet und entsprechen tatsächlich einander. In Abbildung 11 ist zusätzlich noch die Dreiecksvermaschung dargestellt. In beiden Abbildungen (10 und 11) sind die aus der ÖK 50 übertragenen 100 m–Schichtlinien dargestellt.

Die exakte Übereinstimmung von Höhenlinien ist dann von Bedeutung, wenn etwa aus diesen Höhenangaben digitale Geländemodelle abgeleitet werden sollen. Diese Methode ist zur Erstellung von Geländemodellen zwar generell nicht gerade die beste, aber oftmals die einzige mögliche. Wie mit Hilfe der maschenweisen Affintransformation Höhenschichtlinien korrigiert werden könnten, zeigt das folgende Beispiel im Bereich des Taxer Sees, nordwestlich der Gemeinde Gries im Sellrain (Abb. 12).



Abb. 9: Maschenweise Transformation im Bereich Gössenkölle:
Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.
Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierte Seen.

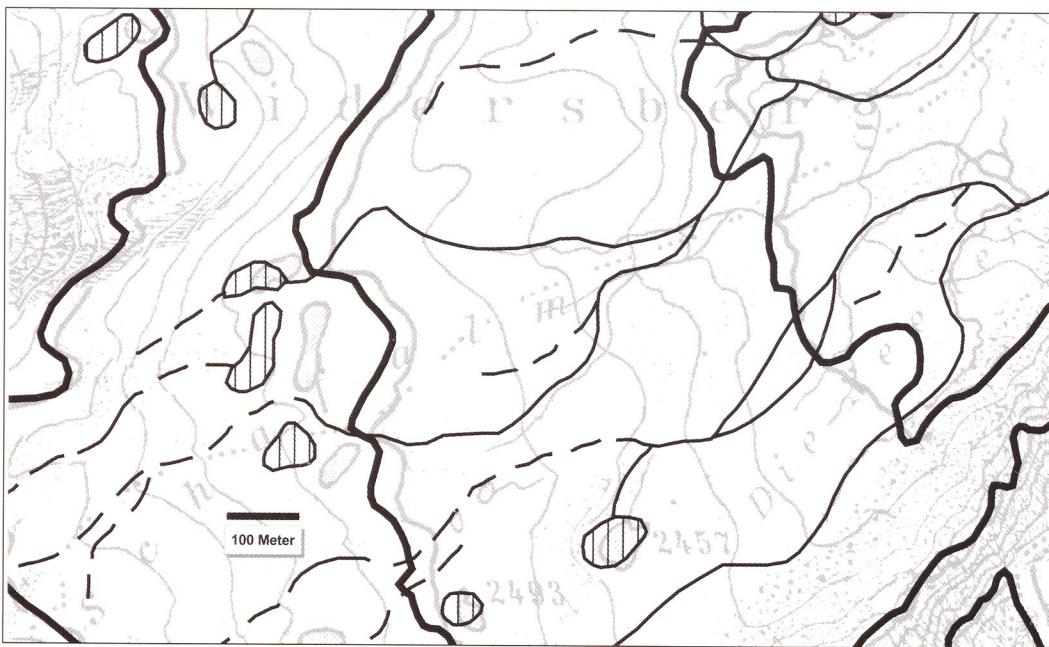


Abb. 10: Transformation 4. Ordnung im Bereich Widersberg:
Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.
Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierte Seen, Bäche und
100 m – Schichtlinien.

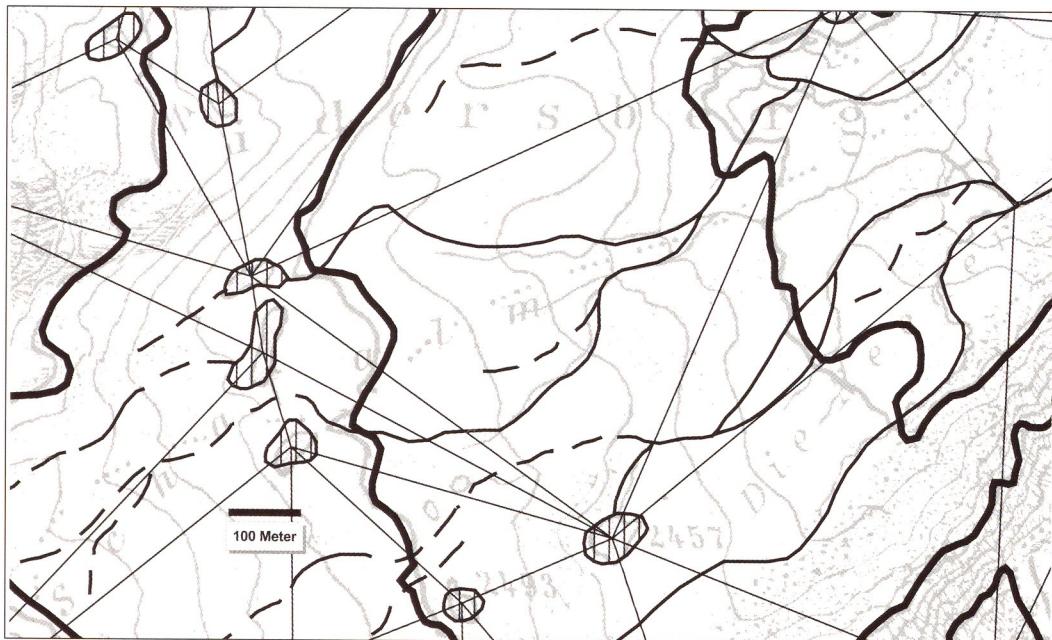


Abb. 11: Maschenweise Affintransformation im Bereich Widersberg:
Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.
Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierte Seen, Bäche und
100 m – Schichtlinien sowie die Dreiecksfacetten.

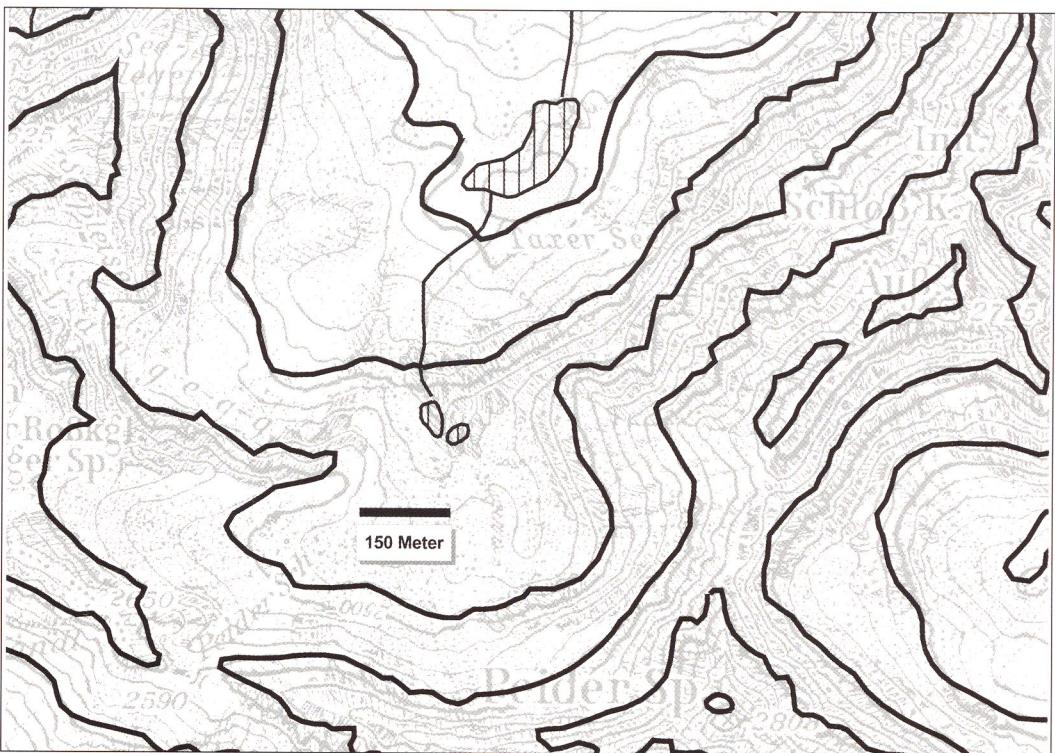


Abb. 12: Maschenweise Affintransformation innerhalb einer Dreiecksfacette im Bereich Taxer See:
Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.
Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierte Seen, Bäche und 100 m–Schichtlinien.

Für die in Abbildung 12 dargestellte Transformation wurden ca. 30 Passpunkte verwendet. Der gesamte Kartenausschnitt liegt innerhalb einer einzigen Dreiecksfacette. Die verzerrte Lage des Sees und die der 100 m–Schichtlinien sind deutlich zu erkennen.

Eine Verbesserung der Transformation in diesem Bereich ist schwierig, da sonst übliche Passpunkte kaum vorhanden sind. Geht man nun davon aus, dass die Höhenlinien in beiden Kartenwerken eine repräsentative Darstellung des Geländes sind, so können als Passpunkte auch markante Richtungswechsel der Isolinien oder etwa Schnittpunkte von diesen mit Bächen oder Wegen betrachtet werden. Das Ergebnis dieser Passpunktverdichtung ist in Abbildung 13 dargestellt. Die aus der ÖK 50 übertragenen Höhenlinien decken sich nun mit den transformierten fast exakt.

Sind auf kleinstem Raum die Verzerrungen sehr stark oder liegen gar kartographische Fehler vor, so hat auch die Passpunktverdichtung ihre Grenzen. Während im Talbereich von St. Sigmund der Zirmbach, aber auch die Landesstraße westlich und östlich des Dorfkerns akzeptabel transformiert wurden, zeigen die Wege und Straßen im Ortsinneren eine Abweichung von bis zu 60 Meter (s. Abb. 14).

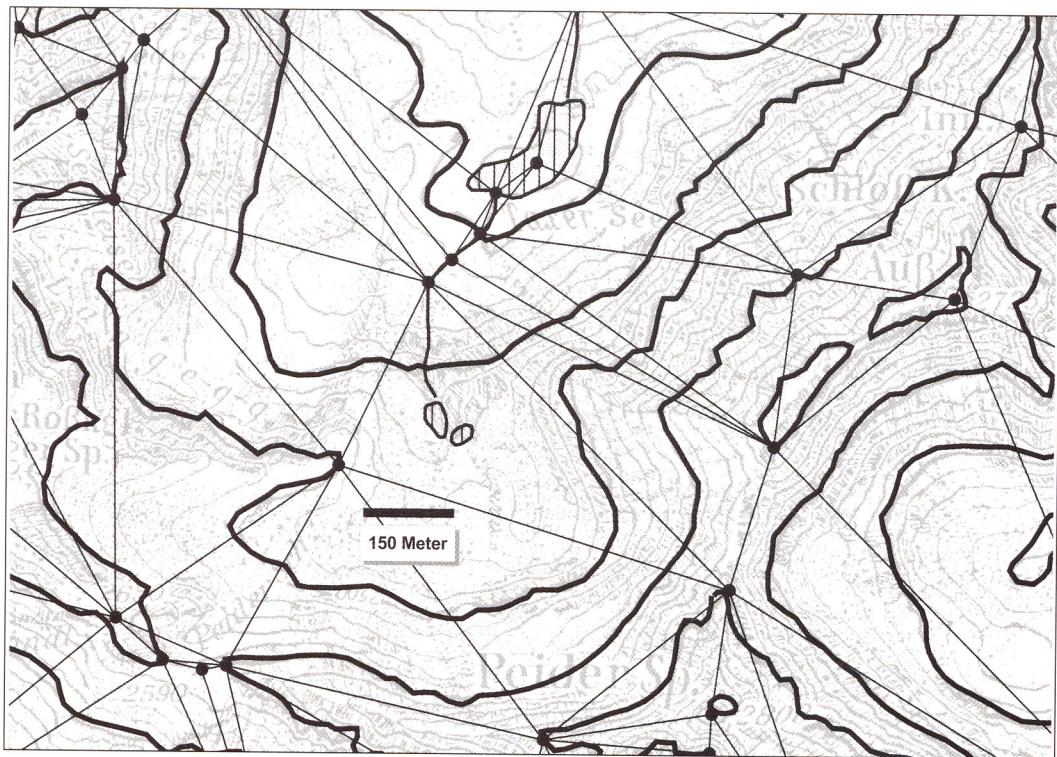


Abb. 13: Maschenweise Affintransformation im Bereich Taxer See: Durch die Hinzunahme von weiteren Passpunkten wird die Triangulation verfeinert.

Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.

Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierte Seen, Bäche und 100 m – Schichtlinien.

Man beachte auch die extreme Verzerrung der Beschriftung „St. Sigmund“. Ursache hierfür ist ein falsch zugewiesener Passpunkt einer Straßenabzweigung.

Wird der Passpunkt entsprechend korrigiert ergibt sich ein Ergebnis wie in Abbildung 15 dargestellt. Die Straßen liegen jetzt zwar besser, allerdings ist die Karte im Bereich des Schriftzuges „St. Sigmund“ noch stärker verzerrt. Daraus wird deutlich, dass keine Transformation in der Lage ist, schlecht verortete oder gar falsch verortete Passpunkte, aber auch kartographische Fehler bzw. Fehler in der Landesaufnahme und darauf beruhende Folgefehler, wie Schriftzüge u.ä., zu korrigieren.

Die Wirkung von Transformationen kann unter anderem an Geraden gut erkannt werden. Die unterirdischen Stollen der künstlichen Zuflüsse zu den Stauseen im Bereich des Kartenblattes eignen sich leider nicht, da deren Verlauf in den beiden Kartenwerken sehr unterschiedlich eingezeichnet ist. Als Kartenbeispiel wurde deshalb ein Skilift nördlich des Ortes Kühthai gewählt. Zunächst wurde die affine Transformation berechnet, die bekanntlich gegenüber geraden Linien invariant ist. In Abb. 16 ist die Verschiebung und leichte Drehung des Skiliftes

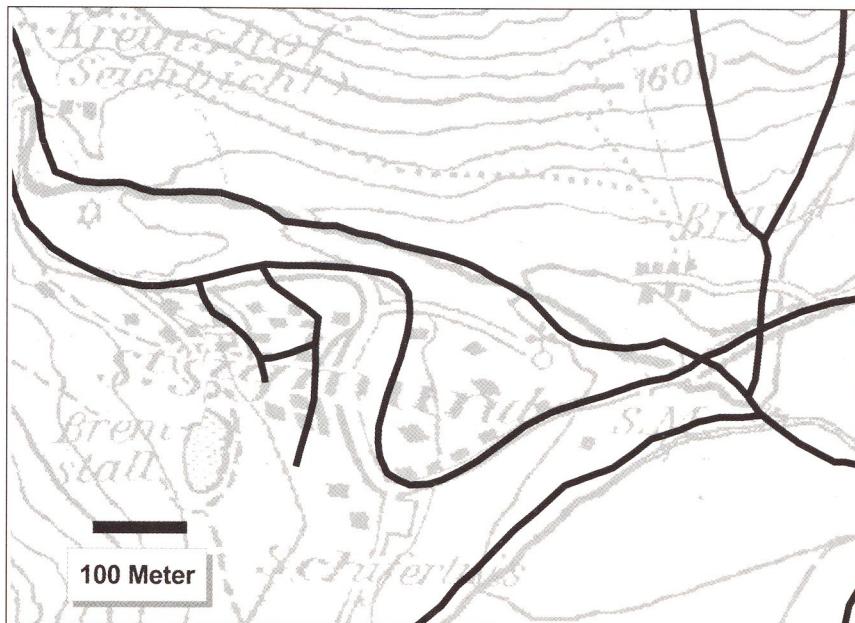


Abb. 14: Maschenweise Affintransformation im Bereich von St. Sigmund mit einem falsch verorteten Passpunkt.
Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.
Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierte Straßen und Bäche.

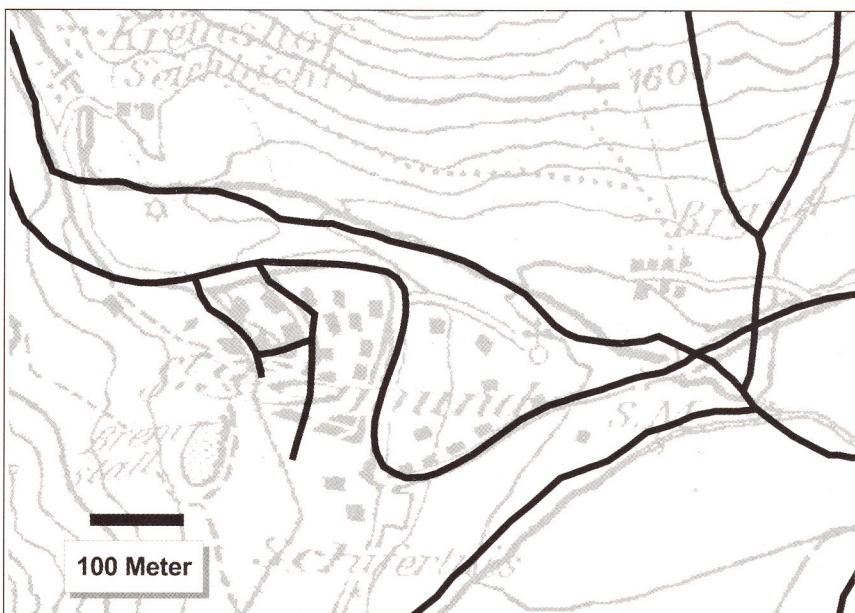


Abb. 15: Maschenweise Affintransformation im Bereich von St. Sigmund mit korrigiertem Passpunkt.
Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.
Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierte Straßen und Bäche.

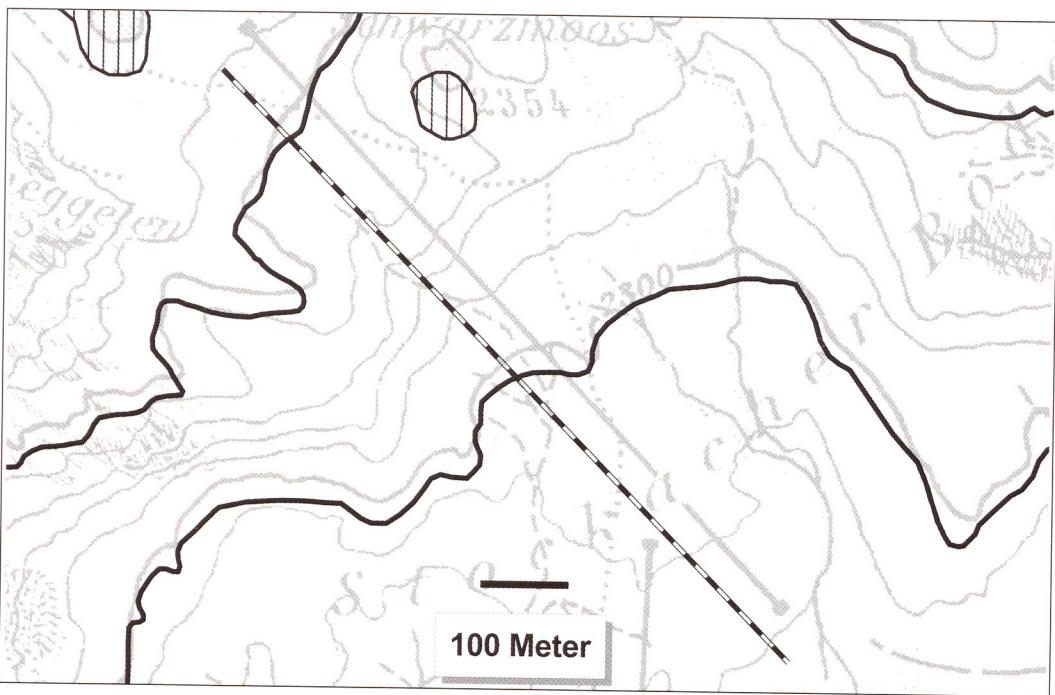


Abb. 16: Affine Transformation im Bereich eines Skiliftes.
 Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.
 Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierter Lift und 100 m–Schichtlinien.

gut zu erkennen. Aber auch in diesem Fall liefert die maschenweise Affintransformation brauchbare Ergebnisse. Wird etwa nur Anfangs- und Endpunkt der Geraden als Passpunkt definiert, ist die Deformation durchaus akzeptabel. Die maximale Abweichung liegt genau an der Kante derjenigen Dreiecksfacette, die den Lift schneidet (siehe Abb. 17).

Die Transformation zeigt aber auch bei der Lagegenauigkeit der 100 m–Schichtlinien eine deutlich Verbesserung. Man beachte, dass auch hier zwei markante Richtungswechsel als Passpunkte für die Triangulation der maschenweisen Affintransformation gewählt wurden (siehe Abb. 17).

6. Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der maschenweisen Affintransformation eine Georeferenzierung der Alpenvereinskarte möglich ist, die großteils einen Lagefehler von unter 10 Meter aufweist. Damit können auf der Grundlage der Alpenvereinskarten erfassene und in Folge digitalisierte Kartierungen mit den Datensätzen der amtlichen Stellen kombiniert und in einem Geographischen Informationssystem überlagert werden. Auch Positionsbestimmungen mittels GPS

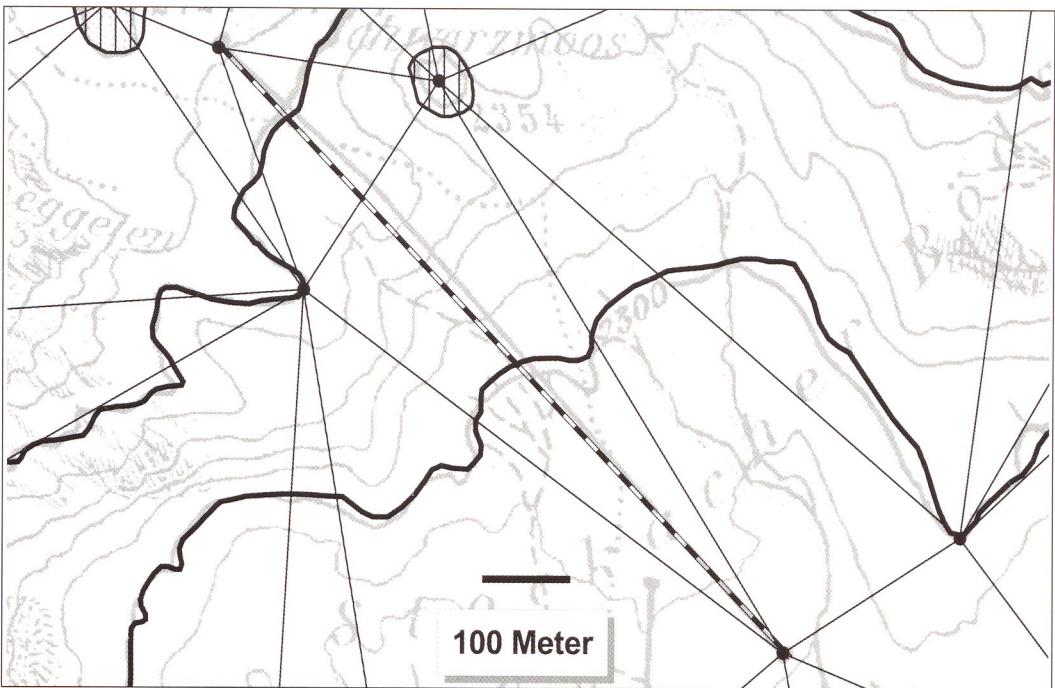


Abb. 17: Maschenweise Affintransformation im Bereich eines Skiliftes.
 Hintergrund (grau): Transformierte Alpenvereinskarte.
 Vordergrund (schwarz): Auf der ÖK 50 digitalisierter Lift, 100 m –
 Schichtlinien sowie die Dreiecksfacetten der Triangulation.

können dann in ausreichender Genauigkeit übertragen werden. Allein schon aufgrund der verschiedenen Maßstäbe und dem damit verbundenen unterschiedlichen Generalisierungsgrad ist eine exakte Überlagerung nicht möglich. Lokal unterschiedliche Verzerrungen können mit den speziellen Eigenschaften der maschenweisen Affintransformation relativ gut ausgeglichen werden. Allerdings leidet darunter das Schriftbild der Karte zum Teil erheblich, was für die digitale Datenübernahme in ein Geographisches Informationssystem allerdings keine Einschränkung darstellt. Die Anzahl und Qualität der Passpunkte beeinflussen das Ergebnis entscheidend. Damit ergibt sich aus den Erfahrungen und Ergebnissen dieser Untersuchung folgende Empfehlung:

- Zunächst sollte eine provisorische Georeferenzierung durchgeführt werden. Hierzu sollten allerdings sehr genaue Passpunkte herangezogen werden. Diese könnten bei Bedarf auch mit GPS vermessen werden. Als Transformationsmethode bietet sich hierfür die affine Transformation bzw. eine polynomiale Transformation niedriger Ordnung an.
- Mit Hilfe dieser provisorischen Georeferenzierung sollte dann eine Klapfungsanalyse durchgeführt werden, um herauszufinden, wie inhomogen die Verzerrungen sind und wo sie gegebenenfalls lokal auftreten.
- Mit diesen Vorkenntnissen kann dann die eigentliche Georeferenzierung mit der maschenweisen Affintransformation gezielt durchgeführt werden, da

jetzt die Passpunkte für die Triangulation, den Verzerrungen angepasst, bestimmt werden können.

- Bereits ein einziger Passpunkt, dessen Lage nicht exakt ist, da er etwa falsch oder nur sehr ungenau verortet wurde, beeinflusst alle umliegenden Dreiecksfacetten und wirkt sich damit auch negativ auf alle entsprechenden Teiltransformationen dieser Flächen aus. Vor allem in Gebieten mit wenigen Passpunkten kann damit ein einziger ungenauer Passpunkt die gesamte Transformation erheblicher Teilbereiche negativ beeinflussen (vgl. Abb. 14, 15).

Damit ergibt sich abschließend die Forderung, dass etwa bei allen Geländebegehungen, ganz gezielt oder nur im Rahmen der normalen Kartenfortführungen, in Zukunft auch GPS-vermessene Passpunkte erfasst werden sollten, um notwendige Transformationen mit möglichst genauen Passpunkten durchführen zu können.

7. Literatur

- ARNBERGER, E. (1970): Die Kartographie im Alpenverein. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, H. 22, München und Innsbruck, 253 S.
- BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGWESEN (Hrsg.) (1991): Österreichische Karte 1:50 000, Blatt 146 – Oetz, Wien.
- BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGWESEN (Hrsg.) (1989): Österreichische Karte 1:50 000, Blatt 147 – Axams, Wien.
- BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGWESEN (Hrsg.) (2001): Über das BEV, http://www.bev.gv.at/prodinfo/produktinformation_2f.htm. Wien.
- ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE (ESRI) (Hrsg.) (1994): Map Projections – Georeferencing Spatial Data. Redlands, 213 S.
- DANA, P. H. (1999): Map Projections, Global Positioning System Overview, Coordinate System Overview, http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/mapproj/mapproj_f.html, Austin.
- GARTNER, G. (1998): Die Alpenvereinskartographie – oder Gedanken über den Begriff „Qualität“ in der Kartographie. In: Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Band 11, Wien, S. 163–168.
- GOLDEN SOFTWARE (Hrsg.) (2000): Didger 2 – User’s Guide. Golden, 185 S.
- HOSCHEK, J. (1984): Mathematische Grundlagen der Kartographie. Mannheim. 210 S.
- KENNEDY, M., KOPP, S. (2000): Understanding Map Projections. Redlands. 110 S.

MICROIMAGES (Hrsg.) (2000 a): TNTmips, Getting Started – Rectifying Images. Lincoln, 20 S.

MICROIMAGES (Hrsg.) (2000 b): TNTmips, Getting Started – Making DEMs and Orthophotos. Lincoln, 20 S.

MICROIMAGES (Hrsg.) (2000 c): TNTmips, Getting Started – Mosaiking Raster Geodata. Lincoln, 24 S.

MICROIMAGES (Hrsg.) (2000 d): TNTmips, Getting Started – Combining Rasters. Lincoln, 20 S.

MICROIMAGES (Hrsg.) (2000 e): TNTmips, Getting Started – Georeferencing. Lincoln, 16 S.

ÖSTERREICHISCHER ALPENVEREIN (Hrsg.) (1996): Alpenvereinskarte 1:25 000, Nr. 31/2, Stubai Alpen – Sellrain. Wien.

Anhang

Glossar

Aerophotogrammetrie: → Luftbildphotogrammetrie

Affintransformation: → Koordinatentransformation zur Umformung von rechtwinkligen, ebenen Koordinaten eines Systems in ein anderes, wobei außer einer Verschiebung und Drehung eine in zwei Hauptrichtungen unterschiedliche Maßstabsänderung vorgenommen wird.

Affinparameter: Die bei der → Affintransformation zu verwendenden → Transformationsparameter.

Bildschirmsdigitalisierung: punktweise digitale Erfassung der am Bildschirm dargestellten geometrischen Daten mit dem graphischen Eingabegerät des Computers (Mauscursor).

Bundesmeldenetz: In Österreich übliche spezielle Gauß-Krüger-Abbildung mit Bezugsmeridian Ferro = Hierro (westlichste der kanarischen Inseln). Damit kann im Gegensatz zu Greenwich Österreich mit drei Meridianstreifen abgedeckt werden.

CAD-System: Computerprogramm für das Computer *Aided Design*, d.h. ein Computerprogramm zur Konstruktion und graphischen Datenverarbeitung.

Datum: → geodätisches Datum

Datumstransformation: → Koordinatentransformation für die Umrechnung von einem → geodätischen Datum in ein anderes.

Delaunay Triangulation: → Triangulation

Digitalisierung: punktweise digitale Erfassung von geometrischen Daten mit Hilfe eines → Digitizers.

Digitizer: Gerät zur punktweisen Erfassung und Umwandlung von geometrischen Daten in digitale Form; es besteht aus einem Digitalisiertisch und einem Gerät (Cursor) zur Punkterfassung.

Digitizerkoordinaten: Koordinaten im System des → Digitizers, auch als Tischkoordinaten bezeichnet

dpi: Abkürzung für *dots per inch*; Maß für die geometrische Auflösung eines → Rasterbildes.

ED 50: Abkürzung für *Europäisches Datum 1950*; → geodätisches Datum, das vor der Festlegung des → WGS 84 in Europa gebräuchlich war.

Ellipsoid: Durch Rotation einer Ellipse um eine ihrer Hauptachsen entstehender Körper; hier: Bezugsfläche der Landesvermessung, auf die sich alle geodätischen Messungen und Berechnungen beziehen.

Ellipsoidübergang: Berechnungsvorschrift zum Wechsel von einer Bezugsfläche auf eine andere.

Entzerrung: hier: Beseitigung von Inhomogenitäten in einer Karte durch geeignete Rechenvorschriften.

Euklidische Distanz: Distanzmaß zwischen zwei Punkten; entspricht der Luftlinienentfernung.

Gauß-Krüger-Projektion: (Karten-) Projektion zur Berechnung von rechtwinkligen, ebenen Koordinaten (→ Gauß-Krüger-Koordinaten) aus geographischen Koordinaten.

Gauß-Krüger-Koordinaten: rechtwinklige, ebene Koordinaten, die durch eine spezielle von C.F. Gauß und H.L. Krüger entwickelte Rechenvorschrift aus → geographischen Koordinaten hervorgehen.

Gauß-Krüger-System: Koordinatensystem, das → Gauß-Krüger-Koordinaten verwendet; das amtliche Koordinatensystem (→ Landeskoordinatensystem) der Bundesrepublik Deutschland.

Generalisierungsgrad: Grad der Abstraktion einer Karte.

geodätisches Datum: geodätische Referenzfläche (z.B. Kugel, → Ellipsoid), die durch fünf Parameter festgelegt wird: Länge und Breite eines Zentralpunktes, Azimut einer Linie von diesem Punkt aus und zwei Konstanten zur Beschreibung der Form und Größe der Referenzfläche.

geographische Koordinaten: Koordinaten auf der Kugel bzw. dem → Ellipsoid, welche die Punktlage als Winkel angeben; gebräuchlich sind geographische Länge und geographische Breite

Georeferenz: Eigenschaft eines raumbezogenen Datenbestands, welche das → geodätische Datum und die (Karten-) → Projektion des Datenbestands festlegt.

Georeferenzierung: Festlegung der → Georeferenz eines raumbezogenen Datenbestands.

Geripplinien: Linien maximaler Richtungsänderung der Höhenlinien, z.B. Tal- und Kammlinien.

GPS: Global Positioning System; Satellitengestütztes System zur Positionsbestimmung.

homologe Punkte: → identische Punkte

identische Punkte: Punkte, deren Koordinaten in zwei Koordinatensystemen bekannt sind.

Kartesisches System: Koordinatensystem mit aufeinander senkrecht stehenden skalierten Achsen.

Klaffungen: Bei einer → Koordinatentransformation in den → identischen Punkten übrigbleibende Differenzbeträge zwischen Soll und Ist in x- bzw. y-Richtung des Koordinatensystems.

Klaffungsvektor: Zusammenfassung der → Klaffungen in x- und y-Richtung für jeden Punkt.

Klaffungsbetrag: Länge des → Klaffungsvektors.

Koordinatentransformation: Umrechnung von Koordinaten von einem System in ein anderes.

Landeskoordinatensystem: Das gebräuchliche Koordinatensystem eines Landes.

Luftbildphotogrammetrie: Bei der Luftbildphotogrammetrie erfolgt die photogrammetrische Aufnahme vom Flugzeug aus.

Meridiankonvergenz: Winkel, der das Zusammenlaufen der Meridiane (Längenkreise) in Richtung Pol in Bezug auf einen Hauptmeridian angibt.

Messtischaufnahme: Altes Verfahren der Geländeaufnahme, bei dem die Punktbestimmung unmittelbar auf graphischem Wege im Gelände erfolgt.

Messtischphotogrammetrie: Ältere Form der → Photogrammetrie, bei der die Lage der Punkte durch meist zeichnerisches Vorwärtseinschneiden (Strahlenschnitt) und die Höhe der Punkte rechnerisch ermittelt wird.

Passpunkte: → identische Punkte, deren Koordinaten bei der → Koordinatentransformation nicht verändert werden dürfen; in der Photogrammetrie: abgebildete und identifizierte Objektpunkte bekannter Lage, die zur Einpassung von Bildern benutzt werden.

Photogrammetrie: Die Photogrammetrie ermöglicht die Darstellung der Geländeoberfläche nach Lage und Höhe aus photographischen Aufnahmen von bekannten Standpunkten aus. Zur photogrammetrischen Punktbestimmung sind im allgemeinen mindestens zwei zusammengehörige Aufnahmen erforderlich.

photogrammetrische Auswertungen: graphische Daten, die durch Auswertung von photographischen Aufnahmen mit Auswertemethoden der Photogrammetrie erhalten werden.

Projektion: Rechenvorschrift zur Umbildung von räumlichen Koordinaten in ebene Koordinaten.

Rasterbild, Rasterdaten: aus rasterförmig angeordneten Einzelpunkten (Pixel) bestehendes Bild.

Redundanz: Grad der Überbestimmung; Differenz zwischen Anzahl der vorhandenen Messelementen und Anzahl der zur eindeutigen Berechnung notwendigen Messelemente.

Resampling: Umrechnung eines Rasterdatensatzes auf ein Raster anderer Orientierung bzw. Auflösung mit Hilfe lokaler Interpolationen.

Residuen: → Klaffungen.

RMS-Error: Root-Mean-Square Error; Quadratmittelfehler; Unterschied zwischen den ursprünglichen Kontrollpunkten und den vom Transformationsprozeß berechneten Kontrollpunkten.

SAPOS: Abkürzung für *Satelliten-Positionierungsdienst*; Positionierungsdienst der deutschen Vermessungsverwaltungen für die Ermöglichung von differentiellen GPS-Messungen.

Scannen: Automatische flächenhafte Digitalisierung von Bildern, Karten, etc.

Selective Availability: Verfahren zur Manipulation und Qualitätsminderung der GPS-Daten.

Soldner-Koordinaten: Koordinaten, die im → Soldner-System vorliegen.

Soldner-System: Von J. G. Soldner Anfang des 19. Jahrhunderts entwickeltes Koordinatensystem. Im Soldner-System werden rechtwinklige, ebene Koordinaten verwendet. Das Soldner-System war ehemals in Teilen Deutschlands, unter anderem in Bayern, das → Landeskoordinatensystem.

Stereophotogrammetrie: Derjenige Teil der → Photogrammetrie, der sich bei der Aufnahme und Ausmessung der Prinzipien des stereoskopischen Sehens und stereoskopischen Messens bedient, also das räumliche Sehvermögen des Menschen ausnutzt.

terrestrische Photogrammetrie: Die vom festen Boden aus aufzunehmende → Photogrammetrie.

Tachymeteraufnahme: Messverfahren der vereinigten Horizontal- und Höhenaufnahme, bei dem durch Beobachtung von je nur einem Instrumentenstandort aus die Unterlagen für die räumliche Festlegung der Geländepunkte gewonnen werden.

Transformationsparameter: Parameter, welche eine → Koordinatentransformation eindeutig festlegen.

Triangulation: Geometrisches Verfahren (Dreiecksvermaschung) zur Konstruktion von flächendeckenden Dreiecksfacetten.

UTM-Projektion: Abkürzung für *Universal Transverse Mercator*-Projektion; (Karten-) Projektion zur Berechnung von rechtwinkligen ebenen Koordinaten (→ UTM-Koordinaten) aus geographischen Koordinaten.

UTM-Koordinaten: rechtwinklige ebene Koordinaten, die durch eine spezielle Rechenvorschrift (UTM-Projektion) aus → geographischen Koordinaten hervorgehen.

UTM-System: Koordinatensystem, das → UTM-Koordinaten verwendet; das weltweit gebräuchliche Koordinatensystem, das sich auch in der deutschen Landesvermessung durchsetzt.

WGS84: Abkürzung für *World Geodetic System 1984*; → geodätisches Datum, das neben den fünf zwingenden Definitionsparametern noch weitere Parameter enthält; international gebräuchliches und verwendbares Datum.

Übersicht Alpenvereinskarten

Topographische Aufnahme:

MTa: Meßtischtachymetrie

TPh: Terrestrische Photogrammetrie

LPh: Luftbildphotogrammetrie

Maßstab 1:25 000 (falls nicht anders angegeben), UTM: Ausgabe mit UTM-Gitter

Nordalpen

| | | Topogr. | Aktuelle |
|--|----------------------------------|--------------|----------|
| | | Aufnahme | Ausgabe |
| Allgäuer-Lechtaler Alpen | | | |
| 2/1 | Allgäuer-Lechtaler Alpen West | MTa | 1999 |
| 2/2 | Allgäuer-Lechtaler Alpen Ost | MTa | 2001 |
| 3/2 | Lechtaler Alpen, Arlberggebiet | MTa | 1995 |
| 3/3 | Lechtaler Alpen, Parseierspitze | MTa | 1996 |
| 3/4 | Lechtaler Alpen, Heiterwand | MTa | 1993 |
| Wetterstein - Mieminger Gebirge | | | |
| 4/1 | Westliches Blatt | TPh | 1994 |
| 4/2 | Mittleres Blatt | TPh | 2001 |
| 4/3 | Östliches Blatt | TPh | 1997 |
| Karwendelgebirge | | | |
| 5/1 | Westliches Blatt | TPh | 1996 |
| 5/2 | Mittleres Blatt | TPh | 2000 |
| 5/3 | Östliches Blatt | TPh | 1996 |
| 6 | Rofan | LPh | 1995 |
| 8 | Kaisergebirge | TPh + MTa | 1998 |
| 9 | Loferer und Leoganger Steinberge | TPh | 1995 |

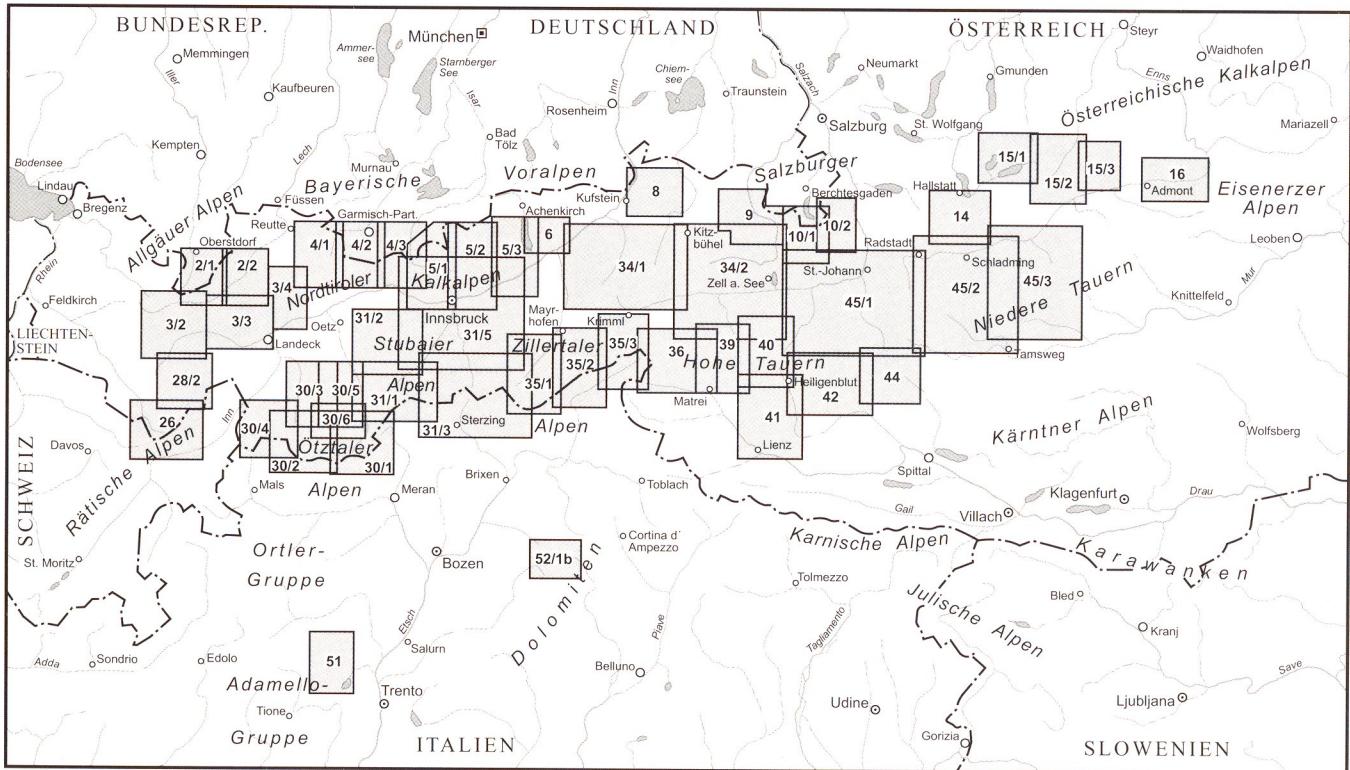
| | | | Topogr. Aufnahme | Aktuelle Ausgabe |
|------------------------------|---------------------------------|-----|---------------------|---------------------|
| Berchtesgadener Alpen | | | | |
| 10/1 | Steinernes Meer | | LPh | 1999 UTM |
| 10/2 | Hochkönig-Hagengebirge | | LPh | 2001 UTM |
| 14 | Dachstein | | TPh | 2001 UTM |
| Totes Gebirge | | | | |
| 15/1 | Westliches Blatt | | LPh | 1996 |
| 15/2 | Mittleres Blatt | | LPh + TPh | 2001 UTM |
| 15/3 | Östliches Blatt | | | 1994 |
| Ennstaler Alpen | | | | |
| 16 | Gesäuse | | LPh | 1994 |
| Zentralalpen | | | | |
| 26 | Silvrettagruppe (Lizenzausgabe) | | Topogr. Aufnahme | Aktuelle Ausgabe |
| | | LPh | 1999 | UTM |
| Verwallgruppe | | | | |
| 28/2 | Mittleres Blatt | | LPh | 1990 |
| Ötztaler Alpen | | | | |
| 30/1 | Gurgl | | TPh | 2000 UTM |
| 30/2 | Weißkugel | | TPh | 2001 UTM |
| 30/3 | Kaunergrat | | TPh | 1999 UTM |
| 30/4 | Nauderer Berge | | TPh | 1998 UTM |
| 30/5 | Geigenkamm | | TPh | 1999 UTM |
| 30/6 | Wildspitze | | TPh | 1994 |
| Stubaijer Alpen | | | | |
| 31/1 | Hochstubai | | TPh | 1996 |
| 31/2 | Sellrain | | TPh | 1996 |

| | | | Topogr. Aufnahme | Aktuelle Ausgabe |
|---|--|--|---------------------|---------------------|
| 31/3 | Brennerberge 1:50 000 (Lizenzausgabe) | | LPh | 1994 |
| 31/5 | Innsbruck/Umgebung 1:50 000 (Lizenzausgabe) | | LPh | 1996 |
| Kitzbühler Alpen | | | | |
| 34/1 | Westliches Blatt 1:50 000 (Lizenzausgabe) | | LPh | 1988 |
| 34/2 | Östliches Blatt 1:50 000 (Lizenzausgabe) | | LPh | 1997 UTM |
| Zillertaler Alpen | | | | |
| 35/1 | Westliches Blatt | | TPh | 1999 UTM |
| 35/2 | Mittleres Blatt | | TPh | 2000 UTM |
| 35/3 | Östliches Blatt | | TPh | 1994 |
| 36 | Venedigergruppe (Lizenzausgabe) | | LPh | 1998 UTM |
| 39 | Granatspitzgruppe (Lizenzausgabe) | | TPh | 1993 |
| 40 | Großglocknergruppe | | TPh | 1992 |
| 41 | Schobergruppe (Lizenzausgabe) | | TPh | 1997 |
| 42 | Sonnblick | | TPh | 1995 |
| 44 | Ankogel-Hochalmspitze | | LPh | 1995 |
| Niedere Tauern 1:50 000 (Lizenzausgaben) | | | | |
| 45/1 | Niedere Tauern I | | LPh | 1995 |
| 45/2 | Niedere Tauern II | | LPh | 1993 |
| 45/3 | Niedere Tauern III | | LPh | 1994 |

Südalpen

| | | Topogr. | Aktuelle |
|------|-----------------------|-----------|----------|
| | | Aufnahme | Ausgabe |
| 51 | Brentagruppe | Mta + LPh | 1996 |
| 52/1 | Langkofel-Sellagruppe | MTa | 1995 |

Übersichtsplan der Alpenvereinskarten



Stand: April 1999

Anschriften

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kurt Brunner

Universität der Bundeswehr München
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Professur für Kartographie und Topographie
Werner-Heisenberg-Weg 39
D – 85577 Neubiberg

Tel.: 0049 / 89 / 6004 – 4049
Fax: 0049 / 89 / 6004 – 4090
e-mail: kurt.brunner@unibw-muenchen.de

Ass.-Prof. Mag. Dr. Armin Heller

Universität Innsbruck
Institut für Geographie
Innrain 52
A – 6020 Innsbruck

Tel.: 0043 / 512 / 507 – 5411
Fax: 0043 / 512 / 507 – 2895
e-mail: Armin.Heller@uibk.ac.at

Dipl.-Ing. Markus Penzkofer

Universität der Bundeswehr München
Institut für Geoinformation und Landmanagement
Werner-Heisenberg-Weg 39
D – 85577 Neubiberg

Tel.: 0049 / 89 / 6004 – 2182
Fax: 0049 / 89 / 6004 – 3906
e-mail: markus.penzkofer@unibw-muenchen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Walter Welsch

Haus des Alpinismus
Praterinsel 5
D – 80538 München

Tel.: 0049 / 89 / 211224 – 0
Fax: 0049 / 89 / 211224 – 40
e-mail: walter.welsch@alpenverein.de



Bibliothek des Deutschen Alpenvereins



049000432598