

# Grundlagen und Praxistipps zum Georeferenzieren

Version:	1.0
Angefertigt von:	Wilfried Klemmer R.+S. Consult GmbH Schänzchen 5 53949 Dahlem Tel.: 02447 911048
Status:	Freigabe
Dateiname:	Georeferenzierung.doc

## Grundlagen und Praxistipps zum Georeferenzieren

(Dipl.-Ing. Wilfried Klemmer Juli/2005)

### Was ist Georeferenzieren?

Wenn man eine Karte einscannet, erhält man ihr Bild in Form einer Datei. Diese Datei kann mit geeigneten Rastereditoren geöffnet, bearbeitet und ausgegeben werden. Beim Scannen bleibt die Originalgröße der Karte erhalten. Ihr Bild entspricht sozusagen genau dem Maßstab der Karte. Möchte man jetzt eine Länge abgreifen oder einen Flächeninhalt bestimmen, so liefert der Rastereditor (wenn er es kann) die Angaben in den Pixeleinheiten der Rasterdatei.

Man müsste jetzt die Anzahl der gemessenen Pixel in Längeneinheiten umrechnen (dazu muss man die Auflösung kennen, mit der die Karte gescannt worden ist) und über den Maßstab der Karte dann die wirkliche Länge ausrechnen.

Viel schöner wäre es, wenn man direkt zwei Punkte im Rasterbild mit der Maus anfahren würde und daraus die Länge der Strecke erhalten würde. Oder anders ausgedrückt: für einen Punkt der Rasterkarte müsste man jeweils seine Koordinaten (des zugrunde liegenden Vermessungsnetzes!) bekommen können; dann wären weitere Auswertungen kein Problem mehr.

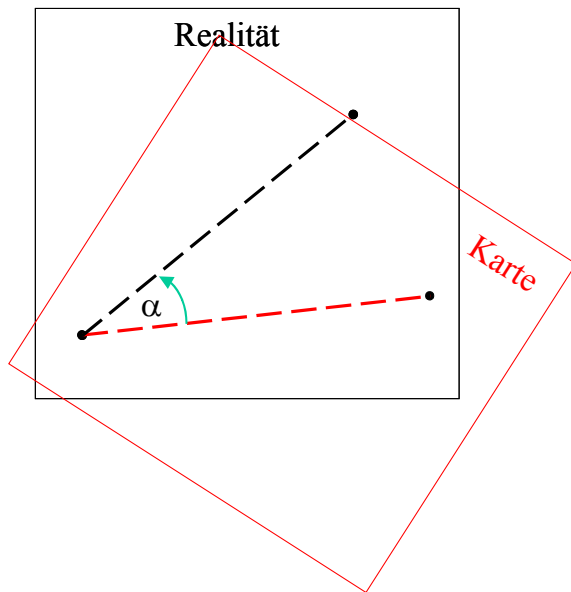
Genau hier setzt die Georeferenzierung an. Bei der Georeferenzierung wird eine Karte so auf das zugrunde liegende Vermessungsnetz eingepasst, das für jeden Punkt des Rasterbildes Weltkoordinaten abgegriffen werden können. Man kann sich den Vorgang des Georeferenzierens folgendermaßen vorstellen:

Das Rasterbild ist auf einem durchsichtigen Gummituch abgebildet und jetzt wird dieses Tuch durch den Vorgang des Georeferenzierens so auf die reale Welt eingepasst, dass ein genau deckungsgleiches Abbild entsteht.

Dieser Vorgang hat nicht nur den Vorteil, dass man danach an jedem beliebigen Punkt seine Weltkoordinaten abgreifen kann. Weiterhin entsteht der Effekt, dass sich benachbarte Karten aneinander anschmiegen. Dadurch entsteht ein flächendeckendes Abbild der Realität. Georeferenzieren ist somit ein Einzerren von Karten auf ihre wirkliche koordinatengetreue Lage.

### Wie erreicht man diesen „Einzerreffekt“?

Zum Georeferenzieren einer Karte benötigt man sogenannte „Passpunkte“. Diese Passpunkte sind Punkte in der Karte, deren Weltkoordinaten bekannt sind. Stellen wir uns die Karte einmal im Maßstab 1:1 vor. Die Einpassung wäre jetzt ganz einfach. Man würde einen Punkt der Karte mit dem entsprechenden Punkt der Wirklichkeit in Übereinstimmung bringen. Jetzt würde man die Karte so lange um den bereits festgehaltenen Punkt drehen, bis der zweite Punkt auch mit dem in der Wirklichkeit existierenden übereinstimmt (siehe Abb. 1). Nach der Drehung wäre die Karte in völliger Übereinstimmung mit der Realität.



**Abbildung 1: Grundprinzip**

Beim wirklichen Georeferenzieren ist der beschriebene „Einpasseffekt“ ein wenig komplizierter. Natürlich existiert die Karte nicht im Maßstab 1:1 und der Passpunkt ist noch nicht zur Deckung mit der Realität gebracht. Aber die prinzipielle Vorgehensweise ist ähnlich. Wiederum soll sie geometrisch anschaulich erklärt werden.

Die Koordinaten der Karte liegen, wenn sie gescannt ist – wie beschrieben – in einem Pixel Koordinatensystem vor. Zur einfacheren Darstellung setzen wir voraus, dass dieses System seinen Ursprung auch in der linken unteren Ecke hat. Drei Schritte müssen jetzt durchgeführt werden, damit die Karte mit der Realität zur Deckung gebracht werden kann.

1. Der Passpunkt der Karte muss in den Passpunkt der Realität verschoben werden. Hierzu muss die Karte um einen bestimmten Betrag nach links und einen bestimmten Betrag nach oben verschoben werden (vgl. Abbildung 2).
2. Die Ausrichtung der Karte entspricht jetzt noch nicht der Wirklichkeit. Deshalb dreht man die Karte so lange um den in Übereinstimmung gebrachten Passpunkt, bis die Richtung zu einem zweiten Passpunkt in Karte und Wirklichkeit übereinstimmt (vgl. Abbildung 3).
3. Jetzt ist nur noch der unterschiedliche Maßstab zwischen Karte und Realität vorhanden. (Achtung!!! Da die Karte ja auf Pixelkoordinaten beruht, kann man nicht den auf der Karte aufgedruckten Maßstab benutzen). Man muss jetzt den Maßstab der realen Strecke zwischen den Passpunkten und der Vergleichsstrecke auf der Karte (in der gleichen Einheit!!!) bestimmen. Geometrisch bedeutet dies: die Karte wird unter Beibehaltung ihrer Ausrichtung und ihres Fixpunktes (linker unterer Passpunkt) so lange vergrößert, bis der zweite Passpunkt der Karte mit dem zweiten Passpunkt der Realität übereinstimmt.

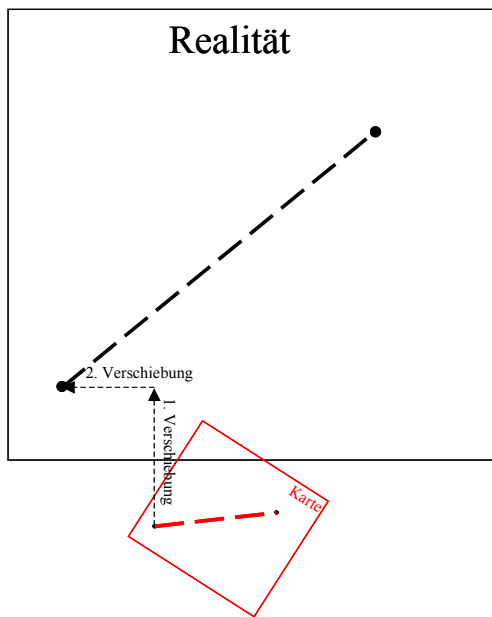


Abbildung 2: Vor der Georeferenzierung

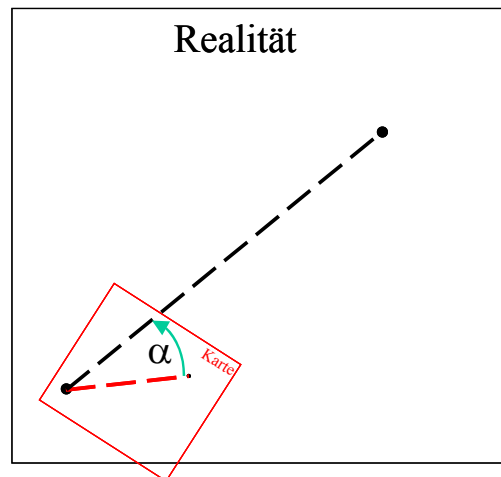


Abbildung 3: Nach der Verschiebung

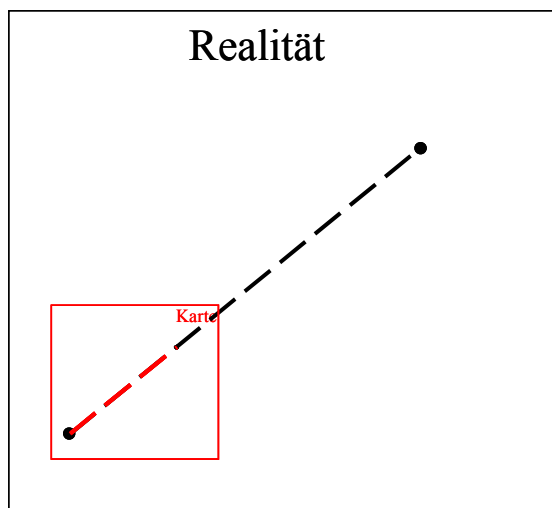


Abbildung 4: Vor der Maßstabsanpassung

Ein Georeferenzierung besteht also aus:

- 2 Verschiebungen,
- 1 Drehung und

- 1 Vergrößerung der gescannten Karte.

Wenn man also die Werte der Verschiebung, der Drehung und des Maßstabs zwischen (Pixel-)Karte und der Wirklichkeit kennt, hat man alle Elemente, die eine Georeferenzierung bestimmen.

So wie hier geometrisch gezeigt, geht man auch mathematisch vor. Man fasst die Pixelkarte und die Realität als zwei unterschiedliche Koordinatensysteme auf und errechnet über oben dargestellten Werte jeweils die Koordinaten des anderen Systems. Die Bestimmung der Werte erfolgt natürlich nicht geometrisch. Hierfür werden die Koordinaten der Passpunkte benutzt und mit den Mitteln der analytischen Geometrie diese Werte errechnet.

Da die Georeferenzierung 4 Unbekannte hat (Verschiebung in x- und y-Richtung, eine Drehung und ein Maßstabsfaktor) benötigt man auch 4 Bestimmungsstücke, um diese Gleichung zu lösen. Diese 4 Bestimmungsstücke ergeben sich durch die beiden Passpunkte, die jeweils 2 Koordinatenpaare haben.

Ein System, das eine georeferenzierte Datei zur Anzeige bringt macht eigentlich nichts anderes, als die Pixelkoordinaten der Datei zu erfassen und über die Abbildungsgleichung mit den speziellen Werte für diese Datei das Bild zur Anzeige zu bringen.

Aus diesem Grund muss eine georeferenzierte Datei immer auch die entsprechenden Werte für die Abbildungsgleichung mit sich führen. Hierzu haben sich zwei Wege etabliert:

1. Die Werte stehen in einer gesonderten Datei (oder an einem speziellen Ort in einer Datenbank)oder
2. die Werte sind im Header der Datei abgespeichert.

Im ersten Fall gibt es eine Georeferenzierungsdatei zur georeferenzierten Rasterdatei, die diese Werte nach einer festen Formatdefinition speichert. Diese Datei hat die gleiche Bezeichnung wie die zugehörige Rasterdatei und nur eine andere Extension (z.B. .tfw), so dass der Zusammenhang leicht herzustellen ist. Im zweiten Fall sind diese Werte im Kopf der Rasterdatei mit abgespeichert.

Wie fast immer im GIS-Bereich gibt es auch für die Georeferenzierung keine einheitliche Norm. Beide Arten der Hinterlegung der Georeferenzierungsparameter kennen leider jeweils noch unterschiedliche Varianten. Diese Varianten erklären sich aus der Formatierung (in welchem Format und in welcher Struktur die Parameter abgespeichert sind) und/oder aus der Modellierung der Abbildungsgleichungen. Hiermit sind Festlegungen gemeint, wie:

- welche Bezugspunkte gewählt werden (linke untere Ecke, Mittelpunkt des Bildes),
- welche Orientierung und Lagerung das Koordinatensystem hat (Ursprung links unten oder links oben, positive x-Achse nach rechts oder von oben nach unten) u.s.w..

Es gibt lediglich eine Reihe von Definitionen, die sich stärker etabliert haben als andere, so dass man letztlich bedauerlicher Weise feststellen muss, dass die Georeferenzierung systemspezifisch und nicht einheitlich festgelegt ist.

## Wichtige Besonderheiten

Die Zusammenhänge der Georeferenzierung wurden oben ausführlich und anschaulich dargelegt. Der Grund dafür ist, dass der Leser jetzt die Zusammenhänge erkennen soll, die für die Praxis eine große Rolle spielen. Von besonderer Bedeutung sind:

- die Anzahl der Passpunkte,
- deren Verteilung und
- die Art des Georeferenzierungsverfahrens.

## Anzahl der Passpunkte

Wie gezeigt, werden für die (einfache) Art der Georeferenzierung zwei Passpunkte benötigt. Besteht bei diesen Punkten irgendeine Art von Ungenauigkeit oder wird sogar ein Punkt falsch identifiziert, wird die gesamte Georeferenzierung fehlerhaft. Um sich vor solchen Fehlern zu schützen, werden die Georeferenzierungsparameter bei sachgerechter Vorgehensweise „überbestimmt“. Diese „Überbestimmung“ bedeutet, dass man mehr Punkte für die Bestimmung heranzieht, als man eigentlich benötigen würde. Verfahren, die diese Überbestimmung nutzen, haben zwei wesentliche Vorteile:

- Das Verfahren kontrolliert sich selbst. Grobe Fehler erkennt man durch Fehleranzeigen des Programms, so dass man vor fehlerhaften Georeferenzierungen geschützt ist.
- Wenn mehr Passpunkte, als eigentlich benötigt würden, vorhanden sind, kann man diese Konstellation nutzen, um Ungenauigkeiten auszugleichen. Verfahren, die dies berücksichtigen, verfügen über besondere mathematische Modelle, die diese Ungenauigkeiten „ausmitteln“ und so zu bestmöglichen Ergebnissen führen. Für die Praxis wird immer empfohlen, sich Programme zu bedienen, die diese Ausgleichung der Ergebnisse bei Überstimmung herbeiführen. Außerdem sollte man immer mindestens einen Passpunkt mehr erfassen, als zur eigentlichen Bestimmung notwendig wäre. Mehr als drei zusätzliche Passpunkte lohnt sich in aller Regel aber nicht. Hier setzt die Wirtschaftlichkeit und auch die praktische Möglichkeit, Passpunkte zu bekommen, sehr schnell Grenzen.

## Verteilung der Passpunkte

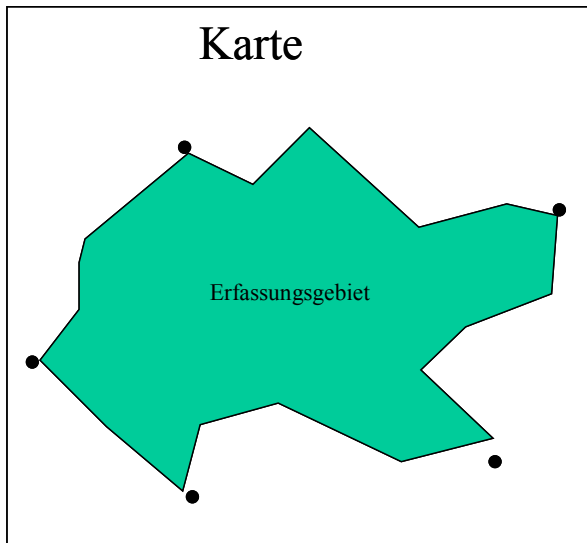
Aus den dargestellten geometrischen Zusammenhängen kann man sich leicht erklären, dass die Passpunkte möglichst nicht eng zusammen liegen sollten. Kleine Verschiebungen beim „Einpassen“ der Karte auf die Realität hätten hier sofort große Gesamtwirkungen. Zweckmäßiger Weise verteilt man daher am besten die Passpunkte gleichmäßig über das Bild und positioniert sie jeweils am äußeren Rand des Gebietes, das in das System übernommen werden soll. In der folgenden Abbildung sind gute und schlechte Beispiele dargestellt.

Das Beispiel links oben zeigt die Idealsituation: überbestimmte Anzahl von Passpunkten in gleichmäßiger Verteilung am Rand des Erfassungsgebietes.

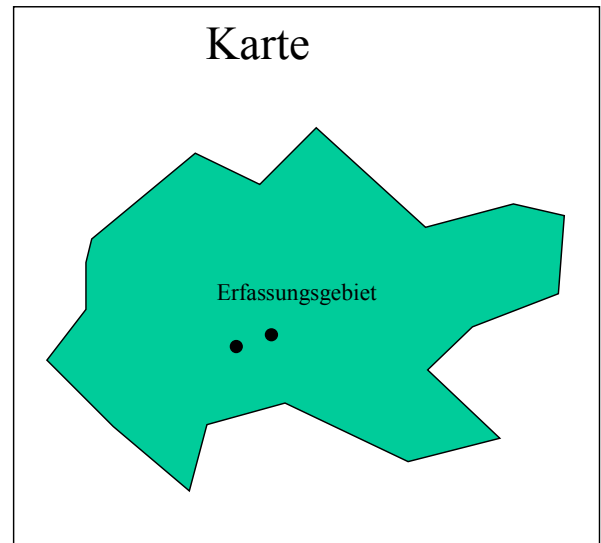
Im Beispiel rechts oben ist die denkbar schlechteste Alternative dargestellt: gerade eine ausreichende Menge Passpunkte, die sehr dicht beieinander liegt.

Links unten ist zwar die Menge der Passpunkte ausreichend, ihre ungeschickte Verteilung wird aber besonders für die rechts oben liegende Bereiche des Erfassungsgebietes größere Ungenauigkeiten bringen.

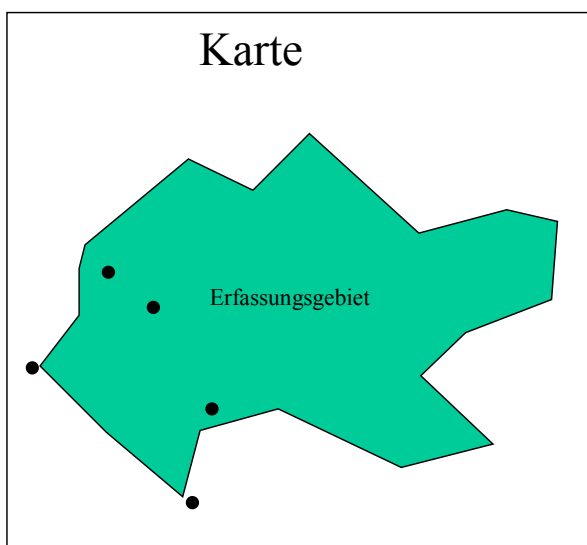
Im Beispiel rechts unten liegen alle Passpunkte auf einer Geraden. Dies führt dazu, dass ein zusätzlicher Passpunkt für die Genauigkeit der Georeferenzierung keinerlei Auswirkungen hat. Der Grund liegt darin, dass mathematisch gesehen keine zusätzliche Information bereitgestellt wird, weil der dritte Punkt sich durch Linearkombination der beiden anderen Punkte ergibt.



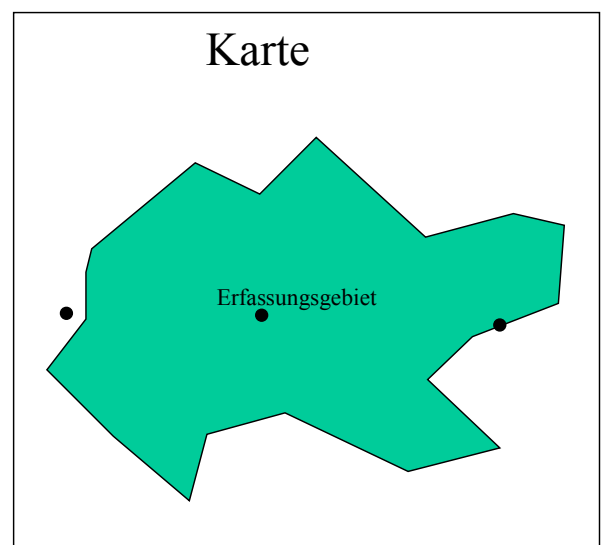
Sehr gut



Ganz schlecht



schlecht



schlecht

Abbildung 5: Beispiele für die Anordnung von Passpunkten

#### Art des Georeferenzierungsverfahrens

Bislang haben wir immer die einfachste Art der Georeferenzierung betrachtet. Für die Praxis gibt es aber mindestens noch zwei andere Verfahren, die eine sehr hohe Bedeutung haben. Um sie zu verdeutlichen gehen wir am besten wieder von typischen Praxisbeispielen aus.

Die Aufbewahrung vieler Pläne geschieht aus Platzmangel häufig nicht „artgerecht“. Wenn nicht maßhaltige Planmaterialien gerollt oder mit Aufhänger versehen werden, ist im Laufe der Jahre ein besonderer Effekt zu beobachten. Die Längsrichtung des Planes dehnt sich aus,

während die Querrichtung weitgehend maßhaltig bleibt. Wie gezeigt geht unser „einfaches“ Georeferenzierungsverfahren in den Abbildungsgleichungen davon aus, dass die Karte gleichmäßig vergrößert wird. Beim Georeferenzieren eines solchen nicht maßhaltigen Planes werden sich also zwangsläufig Fehler ergeben, da die Differenzen „ausgemittelt“ werden. In Längsrichtung abgegriffene Maße werden im System zu kurz abgebildet und in Querrichtung liegende zu lang.

Diesen Effekt kann man sehr gut kompensieren, in dem man ein anderes Abbildungsverfahren für die Georeferenzierung wählt. Hierbei geht man von dem Ansatz aus, dass die x- und y-Richtung eines Planes unterschiedliche Maßstabsfaktoren tragen und nicht wie im „einfachen“ Georeferenzierungsbeispiel gleich sind. Man spricht bei der „einfachen“ Georeferenzierung von einer „Helmert-Transformation“ und bei der Art mit 2 Maßstäben von der „Affin-Transformation“. Da die Affin Transformation eine Unbekannte mehr hat als die Helmert Transformation, benötigt sie auch einen Passpunkt mehr (also mindestens 3).

Der Effekt für die Praxis ist bedeutend. Falls es zu dem Phänomen der unterschiedlichen Ausdehnung gekommen ist, kann dieser Fehler nur durch die Georeferenzierungsart vollständig beseitigt werden.

Seltener, aber auch bedeutend ist die projektive Transformation. Hierzu auch wieder ein charakteristisches Beispiel. In früherer Zeit als Karten noch per Hand hergestellt wurden, hat man sich die Erstellung des Blattrahmens dadurch vereinfacht, dass man ein Muster hergestellt hat und weitere Vervielfältigungen durch eine Reproduktionskamera hergestellt hat. Wenn bei diesem Verfahren nicht Objekt und Bildebene genau parallel liegen, kommt es zu typischen perspektivischen Verzerrungen (ursprünglich parallele Seiten konvergieren). Man kennt diesen Effekt aus Fotografien. Die beiden Ränder einer Straße scheinen sich in einiger Entfernung zu schneiden u.s.w..

Im erwähnten typischen Praxisbeispiel ist dieser Effekt nicht direkt zu erkennen, da es meistens nur zu Differenzen kommt, die wenige Millimeter betragen. Die Art der Verzerrung ist aber weder durch eine Helmert-, noch durch eine Affintransformation zu beseitigen, so dass im System an den Kartenrändern sowohl Überlappungen als auch Leerräume entstehen. Möchte man diesen Effekt kompensieren, muss man zu einer Georeferenzierungsart übergehen, die auf projektive Art die Abbildung herstellt. (In der Praxis entzerrt man das Rasterbild projektiv und ermittelt von diesem entzerrten Bild die Georeferenzierung, weil die Standardparameter der Georeferenzierung nur die Affintransformation zulassen).

Für die projektive Entzerrung benötigt man mindestens 4 Passpunkte.

### **Praktische Tipps für das Georeferenzieren**

Möchte man Pläne georeferenzieren, geht man am besten nach folgendem Muster vor.

1. Klärung, welches Georeferenzierungsverfahren zweckmäßig ist.

Hierzu muss man die dargestellten Zusammenhänge beherrschen, um zweifelsfrei identifizieren zu können, welches Verfahren für die eigene Anwendung am besten ist. Theoretisch könnte man grundsätzlich immer das komplexeste nehmen (projektive Entzerrung). Je komplexer die Art ist, desto mehr Passpunkte werden benötigt, was letztlich den Preis treibt. Falls Zweifel bestehen, sollte man sich an ein sachkundiges Unternehmen wenden, einige Pläne scannen und untersuchen lassen. Achten Sie darauf, dass die dann verkündete Entscheidung nachvollziehbar begründet ist, damit Sie sicher gehen, dass das Unternehmen nicht einfach nur die teuerste Variante gewählt hat!

2. Festlegung der Anzahl der Passpunkte  
Das Georeferenzierungsverfahren gibt die Mindestanzahl vor. Nach unseren Erfahrungen sollte man mindestens einen und höchsten drei zusätzliche Passpunkte vorsehen. Dies ist in Abhängigkeit zur Genauigkeit der Karte und der Passpunkte zu sehen.
3. Festlegung der Verteilung der Passpunkte  
Angestrebt werden sollte die als idealtypisch beschriebene Konstellation. In der Praxis allerdings wird es oft Restriktionen geben. Deshalb sollte man die als ideal dargestellte Situation bestmöglich anhalten.
4. Ermittlung der Passpunkte  
Die Ermittlung der Passpunkte ist oft aufwändig. Schließlich müssen Punkte der Karte identifiziert werden, für die es Weltkoordinaten gibt und diese Weltkoordinaten müssen auch ermittelt werden. Da Dienstleister häufig die spezielle Örtlichkeit, die die Karte wiedergibt nicht kennen, ist der Vorgang der Suche nach oder Bestimmung der Koordinaten vielmals aufwändiger als die Georeferenzierung selbst. Die wirtschaftlich beste Konstellation wird meistens erreicht, wenn der Auftraggeber für die Auswahl der Passpunkte und die Zusammenstellung der Koordinaten sorgt. Man markiert hierzu dünn mit Bleistift die Punktnummer der Karte und registriert in einer Excel Datei die zugehörigen Koordinaten. Auf diese Weise kann der Dienstleister die Koordinaten direkt kopieren und kommt zu günstigeren Preisen.
5. Definition der Georeferenzierungsdatei  
Da es keinen Standard gibt, muss die Datei definiert werden, die die Georeferenzierungsparameter enthält. Hierzu sind Beispiele der Dateien, Dokumentationsunterlagen und die Angabe des Systems, für das georeferenziert werden soll, sehr hilfreich. Vereinbaren Sie mit ihrem Dienstleister eine Freigabe. Danach muss zunächst ein Beispiel georeferenziert und übergeben werden. Das übergebene Beispiel sollten Sie sorgfältig kontrollieren. Wenn alles in Ordnung ist, erteilen Sie die Freigabe für die Bearbeitung des gesamten Auftrags. Falls Sie mit GeoTIFF-Dateien arbeiten (Rasterdateien, die die Georeferenzierungsparameter im Header abgespeichert haben), achten Sie darauf, dass es auch hier verschiedene Arten der Ablegung der Daten im Header gibt. Die alleinige Bezeichnung „GeoTIFF“ ist nicht ausreichend!

## Wichtige Hinweise

Die Bedeutung der Georeferenzierung wird oft unterschätzt. Bitte bedenken Sie, dass die Georeferenzierung dazu genutzt wird, Daten auf dieser Grundlage zu erfassen. Aus Kostengründen entscheidet man sich heute häufig zu einem hybriden Aufbau eines Informationssystems. Dazu scannt man die bestehenden Pläne ein, georeferenziert sie und bildet erst bei der Fortführung Objekte im GIS. Auf diese Weise entsteht im Laufe der Jahre durch bloße Fortführung komplette GIS-Objekte.

Falls die Georeferenzierung der Rasterdateien ungenau erfolgt ist, wird der gesamte Fortführungsbestand auch ungenau aufgebaut. Spätestens zu dem Zeitpunkt, wo anstelle der gescannten Unterlagen die ALK eingeführt wird, ergeben sich zum Teil massive Abweichungen. Dann müssen die ganzen Daten nachgearbeitet werden, was einen erheblichen Aufwand erfordert.

Deshalb sollte man die Ergebnisse der Georeferenzierung sorgfältig kontrollieren. Es wird empfohlen:

vom Dienstleister die Protokolle der Georeferenzierung einzufordern, die enthalten sollten

- den mittleren Fehler der Georeferenzierung und
- die Restklaffungen zu den Passpunkten.

eine Skizze über die Anzahl und Lage der Passpunkte zu fordern.

Die Angabe des mittleren Fehlers liefert eine Information über die Genauigkeit der Georeferenzierung. Sie ist ein grundsätzlicher Indikator.

Da die Karte bei mehr Passpunkten als notwendig vermittelnd eingepasst wird, ergeben sich zu den Passpunkten immer gewisse Restabweichungen, die als Restklaffungen bezeichnet werden. Diese Restklaffungen müssen gleichmäßig vom Betrag sein. Ergibt sich hier einseitig eine starke Abweichung, ist dies ein Indiz dafür, dass der Passpunkt falsch identifiziert wurde oder falsch Koordinaten hat.

### Literatur:

Klemmer, Wilfried: „GIS-Projekte erfolgreich durchführen“  
Bernhard Harzer Verlag  
Karlsruhe 2004