

Nr. 243

Wissensbasierte Interpretation von Vegetationsflächen aus multitemporalen Fernerkundungsdaten

Vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Kian Pakzad

HANNOVER 2001

Diese Arbeit wurde auch veröffentlicht in:

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION

bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 543

München 2001, ISSN 0065-5325, ISBN 3 7696 9582 8

Referenten:

Prof. Dr.-Ing. C. Heipke

Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke

Prof. Dr.-Ing. mult. G. Konecny

Tag der mündlichen Prüfung:

05.Juli 2001

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein allgemeines Konzept zur automatischen Interpretation von Fernerkundungsdaten vorgestellt. Aus diesem Konzept heraus wird auf die Interpretation von Vegetationsflächen fokussiert, die sowohl strukturelle Merkmale als auch temporales Wissen nutzt. Basierend auf diesen Ansätzen wird ein Verfahren zur automatischen multitemporalen Interpretation von Mooregebieten vorgestellt. Das System, auf das sich diese Arbeit stützt, ist ein wissensbasiertes Bildanalyse-System, das zur hochsprachlichen Wissensrepräsentation Semantische Netze verwendet. Diese werden genutzt, um im Verlauf des Interpretationsvorganges mit Hilfe einer symbolischen Verarbeitung nach und nach Hypothesen aufzustellen, diese zu verifizieren und dadurch eine symbolische Beschreibung der interpretierten Landschaftsszene aufzubauen. Die Verifikation der Hypothesen erfolgt über spezielle Bildverarbeitungsoperatoren in den Fernerkundungsdaten.

Das in dieser Arbeit vorgestellte allgemeine Konzept zur Interpretation von Fernerkundungsdaten gruppiert die in der Landschaft vorkommenden Objektarten in Abhängigkeit von den charakteristischen Eigenschaften in unterschiedliche Kategorien. So werden Objektarten unterschieden, die eine vorgegebene Geometrie, eine vorgegebene Textur, ein vorgegebenes Muster oder charakteristische Merkmale aufweisen. Für jede Kategorie werden Interpretationsstrategien vorgeschlagen, die sowohl den Aufbau der Semantischen Netze betreffen als auch die Erstellung der zugehörigen speziellen Bildverarbeitungsoperatoren. Es erfolgt eine Fokussierung auf die Interpretation von Vegetationsgebieten, die der letzten Kategorie angehören. Da derartige Gebiete häufig inhomogen sind und zahlreiche Strukturen aufweisen, sind die bislang verwendeten Ansätze der multispektralen Klassifikation wenig geeignet, da sie derartige Gebiete übersegmentieren und strukturelle Merkmale nicht oder nur in geringem Maße zur Interpretation nutzen. Die hier vorgestellte neuartige Strategie geht von vorgegebenen Segmentgrenzen aus und sucht innerhalb der Grenzen nach strukturellen Merkmalen. Diese sind hochsprachlich beschrieben und können beispielsweise „Fahrspuren“, „unregelmäßige Struktur“ oder „Vegetation“ sein. Die Verifikation derartiger Merkmale in den Bildern erfolgt über Merkmalsanalyseoperatoren.

Zur Interpretation von zeitlichen Veränderungen wird ein neuartiges Konzept vorgeschlagen, das temporale Zustände von Gebieten in diskreter Weise beschreibt, die wahrscheinlichsten zeitlichen Veränderungen zwischen den Zuständen als temporales Wissen in ein Zustandsübergangsdiagramm abbildet und zur multitemporalen Interpretation nutzt. Auf diese Weise kann bei der Interpretation von Bildern bestimmter Zeitpunkte die temporale Historie aus den vergangenen Interpretationen verwendet werden, indem bestimmte Interpretationsmöglichkeiten bevorzugt untersucht und andere a priori ausgeschlossen werden.

Basierend auf den beschriebenen Ansätzen wurde erfolgreich ein Verfahren zur automatischen multitemporalen Interpretation von industriell genutzten Mooregebieten entwickelt. Ausgehend von einer auf Geo-Daten gestützten Initialsegmentierung wird für jeden zu interpretierenden Zeitpunkt eine Resegmentierung und eine Interpretation der Segmente durchgeführt. Durch die Nutzung des temporalen Wissens ist es möglich, Moorklassen zu unterscheiden, die nur aus einer zeitlichen Abfolge heraus erkannt werden können. Die Verwendung des temporalen Wissens und der strukturellen Merkmale eröffnet die Möglichkeit, zur Interpretation von Vegetationsgebieten nur Schwarzweißbilder zu verwenden. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass das vorgeschlagene Verfahren geeignet ist, eine multitemporale Interpretation von Mooregebieten durchzuführen und gegenüber bisherigen Ansätzen durch die verwendeten Strategien zusätzliche Moorklassen unterscheiden kann, multitemporal eine robustere Interpretation durchführt und nicht auf Farbbilder angewiesen ist.

Stichworte: Wissensbasiertes System, Bildinterpretation, Semantisches Netz, Monitoring, multitemporal, Fernerkundung, Moor

Summary

The thesis in hand presents a general concept for the automatic interpretation of remote sensing data with the interpretation of vegetation areas brought into focus, which uses both structural features and temporal knowledge. Based on this concept a method for automatic multitemporal interpretation of moorland is explained. The developed procedures rely on a knowledge based image analysis system, which uses Semantic Nets for knowledge representation in standard language. During the interpretation process these are used for deriving hypotheses by applying a continuous symbolic processing, to verify them, and thus gain a symbolic description of the examined landscape scene. Verification of the hypotheses is carried out in the remote sensing data using specific processing operators.

The introduced general concept for interpretation of remote sensing data groups the object classes found in the landscape into various categories, according to their characteristics. Thus object classes were discerned which possess a given geometry, given texture, given pattern, or characteristic features. Interpretation strategies are suggested for each category, which relate to the creation of the semantic nets as well as to the specific image processing operators. Then the interpretation of vegetation areas belonging to the latter category is brought into focus. As such areas often are inhomogeneous and show numerous structures, the approaches of multispectral classification applied so far are less suitable as they result in oversegmentation, and either do not or to a little extent utilize structural features for interpretation. The new strategy presented here proceeds from given segment borders and searches for structural features within the borders. Such structural features are described by standard language and may be for example "tracks", "irregular structure", or "vegetation". Their verification in the images is done by feature analysis operators.

For interpretation of temporal changes a new concept is suggested, which discretely describes temporal conditions of regions, and which transfers the most probable temporal changes of the given conditions as temporal knowledge into a state transition diagram, then using it for multitemporal interpretation. Thus the temporal history of the past interpretations are used for the interpretation of images of a particular epoch by favouring certain interpretation methods, and a priori excluding others.

Based on the described approaches a procedure for automatic multitemporal interpretation of industrially used moorland was successfully developed. Proceeding from an initial segmentation based on Geo-Data a resegmentation and an interpretation of the segments is carried out for each investigated epoch. By using temporal knowledge it is possible to separate moor classes, which can only be detected in temporal order. The application of temporal knowledge and structural features enables the exclusive use of grey scale images for interpretation of vegetation areas. The results show that the presented procedure is suitable for multitemporal interpretation of moorland, and that it is able to distinguish additional moor classes compared to the approaches used so far. It is further applicable for a more robust multitemporal interpretation, and does not depend on colour images.

Keywords: knowledge based system, image interpretation, semantic net, monitoring, multitemporal, remote sensing, moor

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Motivation und Zielsetzung	7
1.2	Aufbau	8
2	Allgemeine Grundlagen	9
2.1	Status der automatischen Vegetationsextraktion aus Fernerkundungsdaten	9
2.1.1	Monotemporale Interpretation	9
2.1.2	Multitemporale Interpretation	11
2.2	Das wissensbasierte Interpretationssystem AIDA	12
2.2.1	Grundlagen	12
2.2.2	Systemaufbau.....	13
2.2.3	Netzaufbau	15
2.2.4	Knoten.....	15
2.2.5	Attribute.....	15
2.2.6	Relationen.....	16
2.2.7	Regeln.....	16
2.2.8	Steuerung der Interpretation	17
2.2.9	Suchbäume.....	18
2.2.10	Implementierung	20
3	Aufbau und Strategie einer Interpretation mit Semantischen Netzen	21
3.1	Segmentierungsstrategien	21
3.2	Symbolische Beschreibung von Landschaften	23
3.2.1	Beschreibungsebenen.....	24
3.2.2	Objektbeschreibung	25
3.2.2.1	Primitive.....	27
3.2.2.2	Flächenförmige Objekte	28
3.2.2.3	Linienförmige Objekte	28
3.2.2.4	Punktförmige Objekte	29
3.2.2.5	Objekte mit vorgegebener Geometrie.....	30
3.2.2.6	Objekte mit vorgegebener Radiometrie/Textur	32
3.2.2.7	Objekte mit vorgegebenem Muster	34
3.2.2.8	Objekte mit charakteristischen Merkmalen.....	34
3.2.2.9	Objektstrukturen: Gruppierung der Objekte.....	35
3.2.2.9.1	Räumliche Relationen.....	35
3.2.2.9.2	Gruppierung in Sensor- und Auflösungssebenen.....	36
3.3	Interpretation auf der Rasterbildebene	37
3.3.1	Zielsetzung.....	37
3.3.2	Merkmalsanalyseoperatoren	38
3.3.2.1	Vorverarbeitung	38
3.3.2.2	Verifikation von Texturen	38
3.3.2.2.1	Parallele Linien.....	38
3.3.2.2.2	Unregelmäßige Struktur	40
3.3.2.2.3	Struktur mit Vorzugsrichtung.....	40
3.3.2.2.4	Homogenes Gebiet	42
3.3.2.2.5	Verhalten für unterschiedliche Texturen	42
3.3.2.3	Verifikation von spektralen Eigenschaften.....	44
3.3.2.3.1	Farbe.....	44
3.3.2.3.2	NDVI.....	45
3.3.3	Primitivenextraktionsoperatoren.....	45
3.3.4	Matchingoperatoren	46
3.4	Waldextraktion aus SW-Luftbildern mit ATKIS-Vorwissen.....	46

3.5	Multitemporale Interpretation	50
3.5.1	Einführung und Voraussetzungen	50
3.5.2	Interpretationsstrategien	50
3.5.2.1	Sequenzielle Interpretation (Monitoring)	50
3.5.2.2	Parallele Interpretation	51
3.5.3	Symbolische Beschreibung multitemporalen Wissens	52
3.5.4	Implementierung in AIDA	53
3.5.5	Bewertungssystem	53
4	Interpretation von industriell genutzten Mooren	54
4.1	Grundlagen Moor	54
4.1.1	Entstehung	54
4.1.2	Moortypen und ihre Pflanzen	55
4.1.2.1	Niedermoor	55
4.1.2.2	Übergangsmoor	55
4.1.2.3	Hochmoor	55
4.1.3	Nutzung durch den Menschen	55
4.1.4	Degeneration und Gefährdung der Hochmoore	56
4.1.5	Moorschutz	56
4.1.6	Das Tote Moor in Niedersachsen	58
4.2	Manuelle Interpretation von Luftbildern	58
4.3	Automatische Interpretation von industriell genutzten Mooren	60
4.3.1	Moorklassen	60
4.3.1.1	Unterscheidbare Moorklassen	60
4.3.1.2	Bildung von Moorklassen	61
4.3.2	Monotemporale Interpretation	62
4.3.2.1	Aufbau der Wissensbasis	62
4.3.2.2	Wissensbasis für Schwarzweißbilder	64
4.3.2.3	Spezielle Merkmalsanalyseoperatoren	65
4.3.3	Multitemporale Interpretation	66
4.3.3.1	Strategie der multitemporalen Interpretation	66
4.3.3.2	Aufbau der temporalen Wissensbasis	67
4.3.3.3	Multitemporale Interpretation von Schwarzweißbildern	70
4.3.3.4	Initialsegmentierung	72
4.3.3.5	Resegmentierung	72
4.3.3.6	Bewertung konkurrierender Hypothesen	73
4.3.4	Datengrundlage	74
4.3.5	Ergebnisse	76
4.3.6	Bewertung der Ergebnisse	90
5	Bewertung des Ansatzes und der Ergebnisse der Arbeit	94
6	Literatur	97
7	Verzeichnis der Abbildungen	101
	Lebenslauf	102
	Danksagung	103
	Farbbilder	104

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Fernerkundungsdaten¹ werden in hohem Maße zur Extraktion von Landschaftsobjekten verwendet. Das Ziel ist häufig die Integration in Geoinformationssystem(GIS)-Datenbanken. Geoinformationssysteme bieten flexible Möglichkeiten des Zugriffs auf die Daten für unterschiedlichste Anwendungen. Der Bedarf an der Verfügbarkeit von flächendeckenden GIS-Daten ist heutzutage in vielen Ländern für die wesentlichen Landschaftsobjekte schon gedeckt. In Deutschland beispielsweise existiert das ATKIS-Basis-DLM, das die gesamte Fläche der Bundesrepublik abdeckt.

Neben der Existenz flächendeckender Landschaftsdaten nimmt der Bedarf an aktuellen GIS-Daten zu. Dies liegt daran, dass bestimmte auf GIS-Daten zurückgreifende Anwendungen auf deren Aktualität angewiesen sind und in immer kürzeren Zeitabständen verwendet werden. Daraus resultiert, dass die Aktualisierung von GIS-Daten in immer kürzeren Perioden erfolgen muss. Da die Erfassung von Landschaftsobjekten bislang fast ausschließlich manuell durch Auswerter erfolgt und damit langsam und teuer ist, nimmt die Bedeutung der automatischen oder automatisierten Interpretation von Fernerkundungsdaten immer mehr zu. Durch die Automation soll die Effizienz der Erfassung verbessert werden.

Zur automatisierten Objektextraktion besteht die bislang verwendete Standardmethode in der multispektralen Klassifikation angewendet auf Einzelbilder. Sie lässt sich in den meisten kommerziellen Programmpaketen zur fernerkundlichen Bildverarbeitung wiederfinden. Diese Art der Bildinterpretation nutzt jedoch allein die spektralen Gebietseigenschaften und damit nur einen relativ geringen Anteil der verfügbaren Informationen. Da die meisten Landschaftsobjekte keine homogene spektrale Signatur aufweisen, eignet sich die multispektrale Klassifikation nur zur Erkennung einer begrenzten Anzahl von Objektarten. Die Interpretationsleistung des Menschen wird bei weitem nicht erreicht, da dieser wesentlich mehr Informationen in den Interpretationsprozess einbezieht. Er nutzt sein umfangreiches Wissen, um basierend auf seinen Erwartungen Hypothesen bezüglich Farbe, Form und Struktur von einzelnen Objekten sowie bezüglich der Beziehungen zwischen verschiedenen Objekten aufzustellen und in den Bildern zu verifizieren. Die Modelle, die er diesen Interpretationen zugrunde legt, sind sehr umfangreich und seine Interpretationsleistung ist damit relativ hoch, unter der Voraussetzung, dass er Erfahrung in der Interpretation der jeweiligen Objekte hat.

In den letzten Jahren wurden vermehrt Verfahren entwickelt, die komplexere Modelle für die Interpretation von Landschaftsobjekten verwendeten (siehe [17] [50]), insbesondere im Bereich der Erkennung von künstlichen Objekten, wie Straßen und Gebäuden. Es wurde deutlich, dass die Entwicklung und Nutzung von geeigneten komplexen Modellen der Schlüssel zur Verbesserung der automatischen Interpretation ist. Dabei verfügen erfahrene Auswerter mit Expertenwissen über die benötigten Modelle und Strategien zu ihrer Nutzung. Die Überführung der Modelle aus dem Expertenwissen in eine für Computer auswertbare Form stellt die eigentliche Aufgabe für die Entwickler von automatischen Szeneninterpretationssystemen dar.

Die Auswertung von multitemporalen Bilddaten gewinnt mit dem oben beschriebenen steigenden Bedarf an aktuellen GIS-Daten zunehmend an Bedeutung. Die meisten Arbeiten beschränken sich hierbei auf die alleinige Änderungsdetektion und weniger auf die Erkennung der Art der Änderungen (z.B. [48]). Für letztere Aufgabe sind ebenso wie bei der monotemporalen Interpretation komplexe Modelle notwendig, die aus dem temporalen Expertenwissen stammen. Während im monotemporalen Bereich, wie oben beschrieben, für bestimmte Objektarten bereits komplexes Modellwissen verwendet wird, wenn auch meist in impliziter Weise, geschieht dies in der multitemporalen Bildinterpretation bislang nur sehr vereinzelt (z.B. [43]).

In dieser Arbeit werden unterschiedliche Ansätze zum Aufbau von Strategien zur Interpretation von Fernerkundungsdaten aufgezeigt, sowohl für die monotemporale als auch für die multitemporale. Dabei werden für unterschiedliche Problemklassen unterschiedliche Lösungsansätze vorgeschlagen, die alle die Extraktion von Landschaftsobjekten aus Fernerkundungsdaten zum Ziel haben.

Das verwendete System nutzt eine explizite Beschreibung des Expertenwissens. Die Wissensbeschreibung erfolgt in Form von Semantischen Netzen. So lässt sich das Expertenwissen einfach in das System einbinden, bei Bedarf aktualisieren oder an veränderte Problemstellungen anpassen. Die Interpretation findet auf High-Level-Ebene statt. Die vorgegebene explizite Wissensbasis wird hierbei für eine symbolische Verarbeitung genutzt, in der Wissensinhalte verknüpft und zur Erzeugung von Hypothesen verwendet werden. Die Hypothesen sind letztlich in den betrachteten Fernerkundungsdaten zu überprüfen. Daher ist eine Verknüpfung der Interpretation auf High-Level-Ebene mit

¹ Unter Fernerkundungsdaten werden hier sowohl Satelliten- als auch Luftbilddaten verstanden.

Bildverarbeitungsoperatoren auf Low-Level-Ebene notwendig. In dieser Arbeit werden daher auch Bildverarbeitungsoperatoren zur Verifikation der Hypothesen vorgeschlagen.

Ebenso wird beschrieben, wie die zu interpretierenden Flächen aufgrund von in ihnen vorkommenden Merkmalen interpretiert werden können. Dabei wird nicht nur von radiometrischen, sondern auch von Texturmerkmalen ausgegangen. Diese leiten sich aus Beschreibungsformen ab, die hochsprachlich ebenfalls zur Charakterisierung von Flächen verwendet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Beschreibung „unregelmäßige Struktur“, die auf den ersten Blick schwer zu fassen ist. Mit Hilfe einer Gruppe von derartigen Beschreibungsformen ist es beispielsweise möglich, neben der einfachen Überführung des Expertenwissens in das System auch Interpretationen von Gebieten ohne Farbinformationen durchzuführen. Für die dargestellte Anwendung der Interpretation eines Biotops kann so eine Klassifikation in mehrere Klassen durchgeführt werden. Dies ist eine Aufgabe, für die bislang multispektrale oder hyperspektrale Daten unverzichtbar waren.

Im Rahmen dieser Arbeit ist zudem eine Strategie zur Nutzung von temporalem Wissen für die Interpretation von Fernerkundungsdaten im verwendeten Systemansatz entwickelt worden. In [21] wurde diese erweitert und für das genutzte System realisiert. Basierend darauf wurde der entwickelte Ansatz verwendet, um eine multitemporale Interpretation von industriell genutzten Mooregebieten durchzuführen [22].

Eine Überwachung derartiger Gebiete, in denen trotz empfindlicher und geschützter Vegetation industrielle Aktivitäten durchgeführt werden [15] [19], ist aus Naturschutzgründen notwendig. Eine Automatisierung dieses Vorganges würde eine erhebliche Arbeitserleichterung für die Auswerter bedeuten. Für diese Anwendung wird die Umsetzung des Expertenwissens bestehend aus zeitunabhängigem und temporalem Wissen dargestellt.

1.2 Aufbau

In Kapitel 2 werden die allgemeinen Grundlagen dargestellt. Dabei wird in Abschnitt 2.1 auf den Status der automatischen Vegetationsextraktion aus Fernerkundungsdaten eingegangen, wobei sowohl monotemporale als auch multitemporale Ansätze betrachtet werden. In Abschnitt 2.2 wird das verwendete wissensbasierte Interpretationssystem AIDA beschrieben. In Kapitel 3 wird ein allgemeines Konzept zur Interpretation von Fernerkundungsdaten vorgestellt. Nach einer Beschreibung von Segmentierungsstrategien in Abschnitt 3.1 werden in Abschnitt 3.2 Konzepte zum Aufbau von symbolischen Wissensbeschreibungen und in Abschnitt 3.3 zugehörige Bildverarbeitungsoperatoren dargestellt. Zu einer der erläuterten Strategien wird in Abschnitt 3.4 eine Anwendung gezeigt. In Abschnitt 3.5 wird ein Ansatz zur multitemporalen Interpretation vorgestellt. Kapitel 4 geht schließlich auf die Interpretation von Mooregebieten ein. Als Erstes werden die Grundlagen zum Thema Moor in Abschnitt 4.1 erläutert. In Abschnitt 4.2 wird dargestellt, wie eine manuelle Interpretation von Fernerkundungsdaten durchgeführt wird. Die beschriebenen Ansätze werden in Abschnitt 4.3 für eine automatische Interpretation von industriell genutzten Mooregebieten zusammengefügt, wobei sowohl die verwendete Strategie als auch die Ergebnisse dargestellt werden. Kapitel 5 schließt mit einer Bewertung des Ansatzes und der Ergebnisse dieser Arbeit.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Status der automatischen Vegetationsextraktion aus Fernerkundungsdaten

2.1.1 Monotemporale Interpretation

Das Ziel, automatisch Objekte aus Fernerkundungsdaten zu extrahieren, folgt aus der Anforderung, immer mehr Landschaftsdaten in immer kürzeren Zeiträumen zu erfassen und zu aktualisieren. Gespeichert werden die Daten in der Regel in Geoinformationssystemen, wo sie zur späteren Analyse bereitstehen.

Eine immer schnellere Aktualisierung der Daten wurde auch durch die Entwicklung immer höher auflösender Fernerkundungssatelliten ermöglicht, die dieselben Gebiete in immer kürzeren Zeitabständen aufnehmen können. Auf diese Art und Weise ist ein hochfrequentes Monitoring möglich. Die zunehmende Auflösung der Satellitenbilder trägt dazu bei, dass auch komplexere Objektstrukturen erkannt werden können. Ein Beispiel hierzu ist der Satellit Ikonos von Space Imaging, der 1999 startete und Bilder bis zu einer Bodenpixelgröße von 1m (panchromatisch) liefern kann.

Bislang wird die Erfassung der Landschaftsobjekte in der Praxis fast ausschließlich manuell durch Auswerter durchgeführt. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich darin, dass die automatischen Verfahren bislang bei weitem nicht die Zuverlässigkeit aufweisen, die von Seiten der Anwender gefordert wird. Die manuelle Korrektur fehlerhafter Ergebnisse der automatischen Verfahren würde in vielen Fällen den Vorteil der Automatisierung mehr als kompensieren, so dass zusammengenommen die automatischen Verfahren in vielen Fällen ineffizienter sind als die manuelle Erfassung.

Es lassen sich jedoch inzwischen vielversprechende Ansätze beobachten, die in bestimmten Bereichen mittelfristig zu einer Steigerung der Effizienz bei der Objektextraktion führen könnten. Die Extraktion von Objekten erfordert den jeweiligen Verfahren zugrunde gelegte Modelle. Je nach Struktur, Komplexität und Spektralverhalten der einzelnen Objekte müssen unterschiedliche Modelle und damit unterschiedliche Ansätze verwendet werden.

Im Bereich der Vegetation, auf den in dieser Arbeit fokussiert wird, lassen sich zur Modellbildung nur für wenige Objektarten geometrische Einschränkungen definieren, wenn von natürlicher und durch den Menschen wenig veränderter Vegetation ausgegangen wird. Wird beispielsweise die Objektart Wald betrachtet, so kann keine Voraussage über eine typische Form getroffen werden. Bei der Betrachtung von Biotopen lässt sich ebenfalls die auftretende Vegetation geometrisch schlecht voraussagen, denn die Art der flächenhaften Ausweitung hängt von vielen Faktoren ab, die allein aus den Fernerkundungsdaten nicht ermittelt werden können. Weiterhin lassen sich in den meisten Bereichen der Vegetation die Oberflächeneigenschaften, die sich auf die Textur beziehen, schwer beschreiben. Während bei vielen künstlich erzeugten Landschaftsobjekten die Textur in engeren Grenzen vorausgesagt werden kann, ist dies bei natürlichen Objekten aufgrund der Variation der Textur sehr viel schwerer möglich. Da die in den Fernerkundungsdaten abgebildete Textur abhängig von der jeweiligen geometrischen Auflösung ist, wird für die automatische Interpretation von Vegetationsgebieten die Auflösung häufig derart reduziert, dass aus einer texturierten Fläche eine nahezu homogene wird und die Interpretation allein aufgrund der Farbe durchgeführt werden kann. Durch die Reduktion der Auflösung jedoch wird die Anzahl der unterscheidbaren Objektarten in vielen Fällen eingeschränkt und das Vorhandensein mehrerer Spektralkanäle zur Interpretation wird in der Regel obligatorisch.

Die automatischen Verfahren, die eine Zuordnung basierend auf der spektralen Signatur der Pixel durchführen, sind in den meisten Fällen multispektrale Klassifikationen (z.B. [5]:160ff [6]:191ff [71]). Auch die meisten kommerziellen Programmpakete zur Auswertung von Fernerkundungsdaten enthalten als Kernbestandteil multispektrale Klassifikationsverfahren, die mit unterschiedlichen Vor- und Nachbearbeitungs-Operationen gekoppelt werden können. In einigen Ansätzen wird zudem auf die Mischpixelproblematik in digitalen Fernerkundungsdaten eingegangen (z.B. [38]). Dazu werden für die Klassifikation der Bilder Modelle zur spektralen Entmischung der Pixel verwendet.

In [55] wird eine Strategie beschrieben, mit der für die Moorgebiete in Niedersachsen im Rahmen des Niedersächsischen Umweltinformationssystems NUMIS Klassifikationen durchgeführt wurden. Als Basis dienten Landsat TM Daten mit einer Bodenpixelgröße von 30x30m² und 7 spektralen Kanälen. Zunächst wurde innerhalb vorhandener Moorgrenzen das gesamte Gebiet selektiert. Daraufhin erfolgte ein manuelles Anlernen der spektralen Signaturen für die Moorklassen, wobei insgesamt 8 Klassen unterschieden wurden. Mit Hilfe der Kontingenztabelle und Streuellipsen erfolgte sodann eine Abschätzung der Klassifikationsgüte für die unterschiedlichen Klassen und danach die Klassifikation nach der Maximum-Likelihood-Methode. Insgesamt wurden sechs Klassen als gut klassifizierbar eingestuft. Weiterhin wurde ein hierarchischer Klassifikationsansatz vorgeschlagen, der von einer Grobklassifikation der Gebiete in sechs Klassen ausgeht, daraufhin diese Gebiete ausmaskiert und darin Feinklassifizierungen durchführt. Die Feinklassifizierung führte schließlich auf insgesamt 15 Klassen.

Die Problematik der multispektralen Klassifikation besteht darin, dass nur spektrale Signaturen einzelner Pixel betrachtet werden. Weitere Informationen, wie die Nachbarschaften und die Form der Gebiete, fließen nicht ein. So kam es in den Klassifikationsergebnissen des obigen Verfahrens beispielsweise dazu, dass in einem Gebiet ein einziges Pixel als Torfabbau-Gebiet klassifiziert wurde. Dies kann jedoch aufgrund der Tatsache, dass ein Torfabbaugebiet eine bestimmte Mindestgröße aufweisen muss und diese über $30 \times 30 \text{m}^2$ (Pixelgröße Landsat TM) liegt, nicht stimmen. Weiterhin werden auch keine Texturinformationen verwendet. Die Einbeziehung von sog. Texturkanälen in die multispektrale Klassifikation wurde in einigen Arbeiten untersucht (z.B. [73]). Die bisherigen Ergebnisse weisen jedoch nicht darauf hin, dass die multispektrale Klassifikation dadurch verbessert wird. Dies liegt u.a. an der Unregelmäßigkeit natürlicher Texturen, wie sie in der Landschaft vorkommen. Da Texturen jedoch bei der visuellen Interpretation überaus wertvolle Informationen liefern, liegt es nahe, sie im Rahmen anderer geeigneterer Ansätze zu verwenden.

Ein weiterer Ansatz zur Moorinterpretation wird in [63]:160ff beschrieben. Als Datengrundlage standen ERS-1 Radarbilder (Bodenpixelgröße prozessiert $25 \times 25 \text{m}^2$) aus drei aufeinanderfolgenden Jahren zur Verfügung. Dabei wurden aus jedem Jahr etwa drei Aufnahmen verwendet, die die Stadien der Mooregebiete zu mehreren Jahreszeiten darstellten. Auch dieses Verfahren beruht auf einer hierarchischen Klassifizierung. Dabei wurden für alle Bilddaten Bildpaare bestehend aus lokalem Mittelwert und lokaler Standardabweichung berechnet. Die Bildpaare aus allen Zeitpunkten wurden als Ausgangskanäle für eine multispektrale Klassifikation verwendet (im dargestellten Beispiel 16 Kanäle). Daraufhin erfolgte zunächst eine Grobklassifizierung in drei Moorklassen: Dabei wurde eine unüberwachte Maximum-Likelihood-Klassifizierung über das gesamte Gebiet durchgeführt, aus der neun Klassen entstanden. Über eine Korrelationsanalyse zwischen den entstandenen Klassen und einer Biotoptypenkartierung des bearbeiteten Gebietes erfolgte eine Zusammenlegung der Klassen zu drei Grobklassen.

Eine Verfeinerung der drei Grobklassen in acht Feinklassen erfolgte durch eine überwachte Klassifizierung. Dazu wurden jeweils die beiden anderen Grobklassen ausmaskiert. Mit Hilfe von vorher definierten aus der Biotoptypenkartierung abgeleiteten Testgebieten wurden Signaturen angelernt, darauf basierend Klassifizierungen durchgeführt, die Korrelation mit der Biotoptypenkartierung überprüft und die Testgebiete für eine erneute Klassifizierung variiert, indem die Testgebiete, die zu einer Verschlechterung der Ergebnisse führten, entfernt wurden.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Nutzung von Radardaten, die unabhängig von der jeweiligen Wetterlage verfügbar sind. Jedoch werden Daten aus unterschiedlichen Zeitpunkten verwendet, wobei nicht klar wird, wie viele und welche für eine erfolgreiche Durchführung des Verfahrens mindestens notwendig sind. Da es sich auch hier um eine Strategie basierend auf multispektraler Klassifizierung handelt, liegen die oben beschriebenen Probleme ebenfalls vor. Zudem ist in Regionen, in denen innerhalb der Aufnahmezeitspanne aller verwendeten Radardaten Veränderungen eingetreten sind, wie zum Beispiel bei einem Übergang vom Degenerations- zum Torfabbaugebiet, die Zuordnung einer einzelnen Klasse problematisch. Eine Zuordnung von Klassenveränderungen ist nicht durchgeführt worden.

Für einige Vegetationsobjekte existieren auch Ansätze, die zur Objektextraktion keine multispektralen Informationen benötigen. Ein Beispiel für derartige Objekte sind Einzelbäume. Ihre Extraktion aus Fernerkundungsdaten ist z.B. für den Aufbau eines Baumkatasters von Bedeutung. In [4] wird ein Ansatz beschrieben, der hochauflösende Schwarzweißluftbildaufnahmen verwendet, die im Frühjahr erstellt wurden und daher die Bäume unbelaubt zeigen. Dabei wurden im ersten Schritt des Ansatzes Hypothesen für Baumstandorte aufgestellt, indem die Schatten der Bäume als linienförmige dunkle Strukturen gesucht wurden. Der Suchbereich wurde eingeschränkt, indem nur in der Nähe von Straßen und Gebäuden gesucht wurde. Mit dem Vorwissen über den Sonnenstand wurden nur jene Strukturen ausgewählt, welche die korrekte Orientierung aufwiesen. Über den Sonnenstand konnte jeweils auch der Ort des Baumes bestimmt werden. Daraufhin wurden die Baumhypothesen über eine Analyse des jeweiligen Schattens überprüft. Es wurde das Vorwissen verwendet, dass ein Baum beim Stamm beginnend sich immer weiter verzweigt und die Äste immer dünner werden.

In [62] ist ein Ansatz beschrieben, in dem ausgehend von der zu suchenden Baum-Form, Baum-Radiometrie, Sensor-Geometrie und einem Beleuchtungsmodell Templates von Rotationsellipsoiden generiert und in dem jeweiligen zu untersuchenden Bild zugeordnet werden. Dagegen wird in [20] ein regelbasiertes Verfahren zur Verfolgung der Baumkronen verwendet.

Über diese Ansätze hinaus werden auch Aktive Kontur Modelle ([54], auch als Snakes bezeichnet) verwendet, um die Grenzen von Vegetationsflächen zu finden (z.B. [25]). Aktive Kontur Modelle werden auch zur Extraktion von anderen natürlichen Landschaftsobjekten verwendet, wie beispielsweise zur Extraktion von Flüssen in [18]. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass die Modelle über Anfangspunkte positioniert und initialisiert werden müssen. Aus diesem Grund eignen sie sich primär für halbautomatische Verfahren, in denen die ungefähre Lage der Regionen manuell vorgegeben wird und durch die Snakes eine Anpassung an die Kanten stattfindet.

Die oben beschriebenen Verfahren führen die Interpretation jeweils gesondert für einzelne Objektarten durch. Zusammenhänge zu anderen Objektarten werden meist nicht berücksichtigt. Diese Kontextinformationen liefern jedoch für eine Interpretation häufig wichtiges Zusatzwissen. Auch der Mensch nutzt häufig dieses Zusatzwissen bei der Interpretation von vielen Objekten. Aus diesem Grunde kann die Interpretation von Vegetationsflächen nicht isoliert, sondern muss oftmals im Zusammenhang mit anderen Objektarten betrachtet werden.

Wenn eine Interpretation in inhomogenen Vegetationsgebieten durchgeführt werden soll, eignen sich oftmals Straßen zur Abgrenzung von zu interpretierenden Segmenten. Diese Eigenschaft der Straßen ist auch in der vorliegenden Arbeit verwendet worden. Aus diesem Grunde kann die Straßenextraktion auch für automatische Ansätze zur Interpretation von Vegetationsgebieten von Interesse sein. Daher wird nachfolgend ein kurzer Überblick über die Ansätze zur Straßenextraktion gegeben.

Es sind eine ganze Reihe von Verfahren zur Straßenextraktion entwickelt worden. Dabei wird in diesen Verfahren sowohl der linienförmige Charakter der Straßen genutzt (z.B. [16]) als auch das Vorwissen, dass Straßen zusammenhängend sind. Letzteres wird beispielsweise in sog. Trackingverfahren genutzt (z.B. [51]) oder in Ansätzen, die das Ziel haben, ein Straßennetz zu komplettieren (z.B. [75]). Dabei arbeiten die Ansätze in unterschiedlichen Auflösungsbereichen. Weitere Ansätze berücksichtigen unterschiedliche Kontextregionen (offene Landschaft, Wald und Siedlung), in denen zur Straßenextraktion unterschiedliche Methoden zugrunde gelegt werden (z.B. [7]). In [13] [37] werden komplexere Modelle zur Straßenbeschreibung verwendet, die auch Straßenmarkierungen nutzen. In der Regel werden Verbesserungen der Verfahren durch zunehmende Verfeinerung der genutzten Modelle, mit denen immer mehr Spezialfälle und Fehler abgedeckt werden, erreicht. Die Ergebnisse im Bereich der offenen Landschaft sind in der Regel sehr viel besser als im Stadtgebiet, was an der geringeren Szenen-Komplexität der offenen Landschaft liegt.

2.1.2 Multitemporale Interpretation

Multitemporale Interpretationen werden vorwiegend zur Änderungsdetektion in Landschaften verwendet. Nachdem beispielsweise eine Erfassung von GIS-Daten für einen bestimmten Zeitpunkt durchgeführt worden ist, sind die Veränderungen in bestimmten Zeitabständen gegenüber der durchgeführten Erfassung von Interesse, um die Datensätze zu aktualisieren. Hierbei ist nicht nur die Detektion der Änderung von Interesse, sondern auch die Erfassung der Art der Änderung. Für eine multitemporale Interpretation sind Fernerkundungsdaten aus mehreren Zeitpunkten für die gleichen Gebiete erforderlich, aus deren Verarbeitung die Erkennung von Änderungen durchgeführt werden kann.

Folgende Ansätze können hierzu unterschieden werden ([47]:21ff):

- Vergleich von Spektren (Pixel-Wise, Scene-Wise): Bei diesem Ansatz wird ein Vergleich der Spektren in den unterschiedlichen Bildern durchgeführt. Dabei wird zwischen den Methoden zum pixelweisen (pixel-wise) und szenenweisen (scene-wise) Vergleich unterschieden. Beim pixelweisen Vergleich erfolgt die Detektion durch einen Vergleich der Fernerkundungsdaten auf Pixelebene [61]. Im einfachsten Ansatz wird der Vergleich direkt mit den Grauwerten der Bilder durchgeführt. Die Bilder können beispielsweise pixelweise voneinander subtrahiert werden. In Regionen, in denen sich stärkere Veränderungen vollzogen haben, werden so größere Differenzen sichtbar. Weitere Methoden analysieren Veränderungen von Vektoren, die aus Spektralkanälen bestehen, von Verhältnissen spektraler Kanäle oder von Indizes (z.B. Vegetationsindex). Voraussetzung hierfür sind die Verwendung von gleichartigen Fernerkundungsdaten (gleiche Sensorart, Kanäle und gleicher Maßstab). Zudem sollten die Bilder zur gleichen Tages- und Jahreszeit aufgenommen worden sein. Weiterhin müssen sie geometrisch genau aufeinander entzerrt sein. In vielen Fällen ist ebenfalls eine radiometrische Entzerrung notwendig.

Der szenenweise Vergleich versucht die Unterschiede zwischen den multitemporalen Daten, die durch die atmosphärischen Einflüsse, durch die Beleuchtungseinflüsse und durch die Variation der Sensoren entstehen, zu eliminieren, indem z.B. Normalisierungen durchgeführt werden. Auch hier ist eine hochgenaue geometrische Entzerrung notwendig.

Insgesamt sind derartige Änderungsdetektionen aufgrund der genannten Voraussetzungen, die einen relativ hohen Aufwand an Vorverarbeitung erfordern, problematisch. Die Ergebnisse zeigen die Detektion einer Änderung, jedoch nicht, was für eine Änderung sich ergeben hat.

- Vergleich von Segmenten (Post-Classification): Diese Methode gehörte zu den ersten, die zur Änderungsdetektion von digitalen Fernerkundungsdaten verwendet wurden [72]. Für jeden zu untersuchenden Zeitpunkt wird eine neue unabhängige Segmentierung durchgeführt. Der Vergleich der Bilder aus unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgt daraufhin auf der Segmentebene [48]. Sind die Segmentierungsergebnisse ungenau, kann dies zu Problemen bei der Vergleichbarkeit führen. Passen die Segmente nicht zusammen, muss entschieden werden, ob tatsächlich eine Veränderung stattgefunden hat oder ob die Unterschiede aus der Segmentierungsmethode resultieren. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens

besteht darin, dass vorhandene Informationen über die schon durchgeführten Interpretationen nicht in die Interpretation des jeweiligen neuen Zeitpunktes einfließen, obwohl sie wertvolle temporale Informationen enthalten können.

- Auf der semantischen Ebene: Es werden zur Interpretation der neuen Zeitpunkte temporale Informationen verwendet. Die temporalen Informationen formulieren die möglichen Veränderungen der betrachteten Klassen. Sie können auf diese Weise den Suchbereich und damit die Interpretationsmöglichkeiten der neuen Zeitpunkte einschränken und so die Interpretationssicherheit erhöhen. Selbst bei der Segmentierung kann auf diese Weise das temporale Wissen verwendet werden und sie damit verbessern. Derartige Ansätze werden bislang nur vereinzelt verwendet (z.B. [43]). Meist erfolgt die Beschreibung des temporalen Wissens jedoch in impliziter Weise. Daher ist das Expertenwissen, verglichen mit expliziten Wissensbeschreibungen, meist aufwendiger für das Interpretationssystem zu formulieren, und die Verfahren sind schwieriger auf andere Problemstellungen adaptierbar und damit weniger flexibel. Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren ist dieser Gruppe zuzuordnen.

2.2 Das wissensbasierte Interpretationssystem AIDA

2.2.1 Grundlagen

Bei der Interpretation von Fernerkundungsdaten – der Schwerpunkt dieser Arbeit - ist es notwendig, das Wissen über die Landschaften, die interpretiert werden sollen, zu beschreiben. Dazu wird versucht, die Realität in ein Modell zu fassen. Das Modell muss geeignet sein, automatisch von einem Interpretationssystem verwendet zu werden und eine Verarbeitung im Hinblick auf die Zielsetzungen zu erreichen.

Derartige Modelle lassen sich implizit oder explizit formulieren. Eine implizite Beschreibung hat den Vorteil, dass sie in der Regel stärker auf die jeweilige Problemstellung zugeschnitten und optimiert werden kann. Demgegenüber bietet sie im Vergleich zur expliziten Beschreibung eine geringere Flexibilität im Hinblick auf Modifikationen der Problemstellung. Auch bei der Interpretation komplexer Szenen, deren Inhalte nicht genau vorhersagbar sind, weisen Systeme mit einer expliziten Beschreibung Vorteile auf. Zudem lassen sich Landschaftsbeschreibungen in expliziter Form meist sehr viel einfacher aufbauen. Die explizite Beschreibung eignet sich daher gut für die Interpretation von Fernerkundungsdaten, deren Inhalte in der Regel komplex sind und in denen die Objekte, Objektteile und Strukturen stark variieren können. Wissensbasierte Systeme können eine explizite Wissensbeschreibung zur automatischen Interpretation nutzen.

In der Literatur sind zahlreiche Ansätze für wissensbasierte Systeme zur Interpretation von Bildern vorgestellt worden. Insbesondere die Interpretation komplexer Bildinhalte war die Zielsetzung vieler Methoden. Die Unterschiede bestehen primär in den Steuerungsmechanismen und den Wissensrepräsentationsformen. Zu den ersten wissensbasierten Systemen, die spezifische Regeln zur Analysesteuerung verwendeten, gehören die Systeme SPAM [52], SIGMA [49] und MESSIE [12].

Nach [45] ergeben sich zwei Forderungen für wissensbasierte Systeme in der Bildverarbeitung:

1. Unabhängigkeit der Bildanalysesteuerung von den verwendeten Wissensinhalten.
2. Explizite Form der Wissensinhalte im System. Das System muss diese Form automatisch nutzen können.

Im Wesentlichen besteht ein wissensbasiertes System zur Bildinterpretation aus folgenden Teilen (siehe auch Abbildung 1):

- *Daten*: Diese bestehen in der Bildverarbeitung vorwiegend aus Rasterbildern. Oftmals wird zwischen Daten in mehreren Abstraktionsebenen unterschieden. Dabei bestehen die Daten der untersten Ebene in den meisten Fällen aus digitalisierten Kameraaufnahmen. In den nächsten Ebenen erfolgt immer mehr eine Gruppierung der Pixel oder der Pixelgruppen zu Bereichen einheitlicher Bedeutung (Segmenten). Die Daten der obersten Ebenen bestehen meist aus symbolischen Beschreibungen.
- *Modell*: Im Modell wird der aktuelle Stand der Interpretation beschrieben. Zumeist wird darin auch in unterschiedlichen Abstraktionsebenen gearbeitet. Jeder Abstraktionsstufe im Datenbereich wird ein Modell gleicher Abstraktionsstufe gegenübergestellt. Das Modell ist aus dem jeweiligen Stand der Interpretation generiert worden. Da sich jeweils Daten und Modell der gleichen Abstraktionsstufe gegenüberstehen, lässt sich ein Vergleich des Daten- und des Modellbereichs durchführen, aus der eine Bewertung des augenblicklichen Interpretationsstandes abgeleitet werden kann.
- *Prozeduren*: Diese dienen der Modifizierung des Datenbereiches. Die Prozeduren können eine Verarbeitung der Rasterdaten durchführen oder auch die Daten in den höheren Abstraktionsstufen verarbeiten.

- *Wissensbasis*: Das Vorwissen über die zu verarbeitenden Daten, deren Bedeutungen und Verknüpfungen, sowie die Zielsetzung der Verarbeitung sind in der Wissensbasis abgelegt.
- *Steuerung*: Die Steuerung des Ablaufes der Analyse erfolgt in diesem Teil. Aus einem Vergleich zwischen Datenbereich und Modellbereich erfolgt eine Bewertung, aus der sich in Verbindung mit der Wissensbasis der weitere Verfahrensablauf ergibt. Das Ziel ist ein möglichst gutes Angleichen zwischen Modell und Daten.

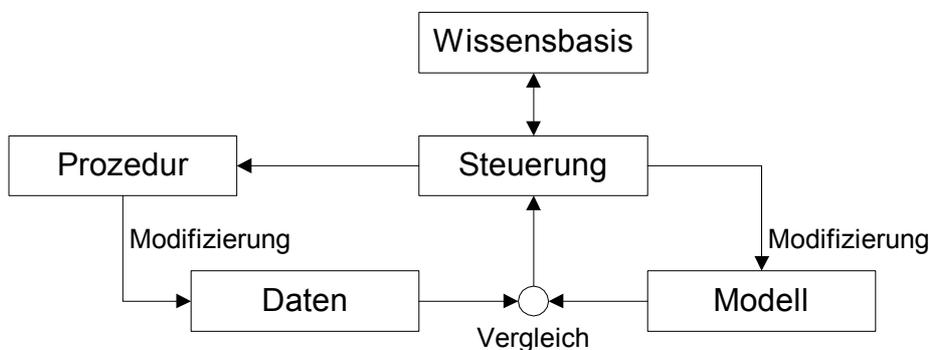


Abbildung 1: Allgemeine Struktur eines wissensbasierten Systems

Das hier genutzte wissensbasierte Bildanalyzesystem verwendet als Wissensrepräsentationsform Semantische Netze. Ein wesentlicher Vorteil von Semantischen Netzen besteht darin, dass sie der Art und Weise, wie sich Menschen Gegenstände und Zusammenhänge einprägen, nahe kommen und daher durch den Menschen einfacher als viele andere Beschreibungsarten aufgebaut werden können. Das verwendete System ist eine Entwicklung des Instituts für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung der Universität Hannover und nennt sich AIDA (Automatic Image Data Analyzer). Während der Untersuchungen zu dieser Arbeit wurde das System weiterentwickelt und ausgebaut.

Der Aufbau des Systems AIDA wurde in Anlehnung an das System ERNEST [56] durchgeführt. ERNEST definiert einen Formalismus zur expliziten Wissensrepräsentation, die im Vergleich zu vorherigen Systemen von wenigen anwendungsunabhängigen Regeln ausgewertet wird. Die Regeln in dem System sind allerdings in einem Steuerungsalgorithmus implizit formuliert. Dies erschwert die Anpassung an unterschiedliche Analysestrategien. Zudem ist ERNEST nicht allein auf die Bildanalyse ausgelegt, sondern erlaubt auch andere Anwendungen. Dies bedeutet auch, dass das System nicht auf die Bildanalyse optimiert wurde. Im Unterschied dazu wurde der Schwerpunkt bei der Entwicklung von AIDA auf die Bildanalyse gelegt. Die verwendeten Regeln sind ebenso wie die Wissensbasis explizit beschrieben

Das System AIDA wurde maßgeblich von Tönjes [69] entwickelt und von Growe [21] im Bereich der multitemporalen Interpretation (siehe Abschnitt 3.5) erweitert. Im Folgenden erfolgt eine kurze Beschreibung des Systems.

2.2.2 Systemaufbau

Der Aufbau im verwendeten Bildanalyzesystem wurde auf die Interpretation von Fernerkundungsdaten ausgelegt. Die Architektur ist in

Abbildung 2 dargestellt. Das System besteht aus drei Blöcken: der Eingabe, der Szenenanalyse und der Ausgabe. Die Eingabedaten bestehen zum einen aus dem generischen Modell, in dem die Wissensbasis über die zu interpretierende Szene vorhanden ist. Sie beschreibt das Vorwissen über die in der Szene vorkommenden Objekte mit ihren Teilobjekten und Eigenschaften ebenso wie räumliche Beziehungen der Objekte zueinander. Das generische Modell wird im verwendeten System als semantisches Konzeptnetz beschrieben (siehe Abschnitt 2.2.3).

Weiterhin werden Fernerkundungsdaten, welche die zu interpretierende Szene zeigen, als Eingangsdaten verwendet. Sie liegen in der Regel als Rasterdaten vor. Wenn mehrere Rasterdaten verwendet werden (multisensorielle und/oder multitemporale Daten), sollten sie geometrisch miteinander vergleichbar sein. Dies kann durch eine Entzerrung erreicht werden.

Zusätzlich zum generischen Modell können optional GIS-Daten als weitere Eingabedaten verwendet werden. Diese können zum Aufbau einer initialen Szenenbeschreibung verwendet werden, um beispielsweise eine Verifikation in den aktuellen Fernerkundungsdaten durchzuführen und/oder den Suchbereich für die Interpretation zu verringern.

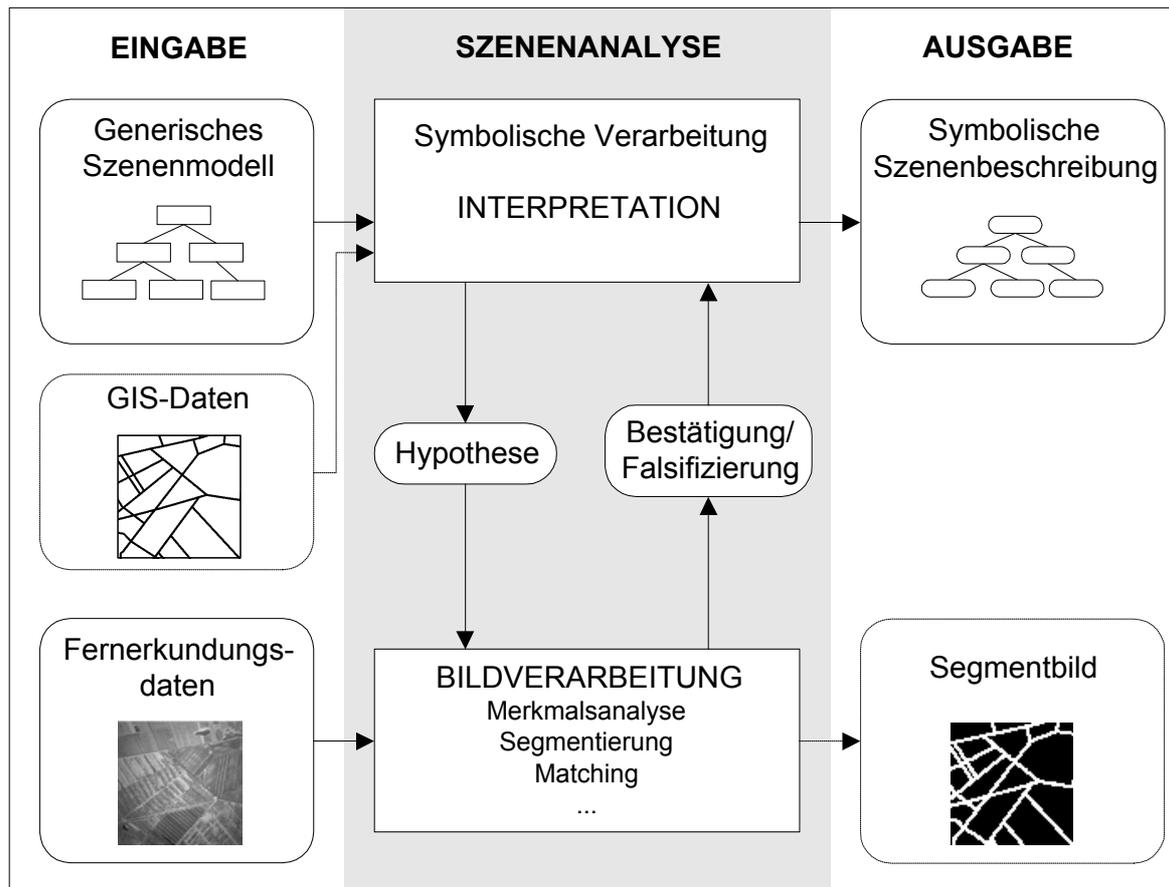


Abbildung 2: Architektur des wissensbasierten Bildanalyse-Systems

Im mittleren Block ist die Szenenanalyse dargestellt. Sie besteht aus dem Interpretationsmodul, das eine symbolische Verarbeitung durchführt, und aus dem Bildverarbeitungsmodul. Die symbolische Verarbeitung erstellt und modifiziert im Verlauf der Interpretation nach und nach, basierend auf dem generischen Szenenmodell und den eventuell vorhandenen GIS-Daten, ein Instanzennetz (siehe Abschnitt 2.2.3), das symbolisch den aktuellen Stand der Interpretation beschreibt und am Ende der Interpretation die fertige Szenenbeschreibung enthält.

Die Interpretation kann modellgetrieben top-down oder datengetrieben bottom-up erfolgen. Beim modellgetriebenen Ansatz werden aus der symbolisch beschriebenen Wissensbasis Hypothesen aufgestellt, die in den Rasterbildern überprüft werden müssen. Dabei stellt das Modul für die symbolische Verarbeitung eine Hypothese über die Existenz, Form, Farbe, Textur und Lage der gesuchten Objekte auf und schickt diese an einen bestimmten Bildverarbeitungsoperator. Je nach Problemstellung können die Bildverarbeitungsoperatoren Merkmalsanalysen innerhalb bestimmter Segmentgrenzen durchführen, Segmente mit bestimmten Eigenschaften extrahieren, ein Matching zu bekannten Referenzbildern durch- oder andere Operationen ausführen. Alle Operationen haben als Gemeinsamkeit den Zugriff auf die Rasterbilddaten. Somit wird an dieser Stelle die Low-Level-Verarbeitung im Interpretationsprozess durchgeführt, während die symbolische Verarbeitung den High-Level-Bereich der Interpretation darstellt.

Die Bildverarbeitungsoperatoren liefern eine Bestätigung oder eine Falsifizierung der aufgestellten Hypothesen zurück an die symbolische Verarbeitung. Die symbolische Verarbeitung modifiziert dadurch die aktuelle Szenenbeschreibung und fährt mit der Interpretation fort. Der Zyklus aus Aufstellen von Hypothesen und Verifizieren in den Rasterbildern setzt sich so lange fort, bis ein vorgegebenes Ziel erreicht ist oder die Interpretation nicht mehr fortgeführt werden kann.

Neben der modellgetriebenen Strategie kann die Interpretation auch datengetrieben durchgeführt werden. Dabei werden zuerst durch Bildverarbeitungsoperationen die Rasterbilder verarbeitet. Dies kann beispielsweise eine Segmentierung sein. Danach werden die vorab erstellten Segmente im Interpretationsprozess analysiert. Während der Interpretation erfolgt nicht mehr ein direkter Zugriff auf die Rasterbilddaten. Näheres zu den Strategien ist in Abschnitt 3.1 beschrieben.

Das Ergebnis der Interpretation ist die symbolische Beschreibung der Szene in den betrachteten Fernerkundungsdaten. Sie entspricht, wie oben erwähnt, dem Endzustand der immer wieder von der symbolischen Verarbeitung modifizierten Szenenbeschreibung. Daneben kann als Ergebnis auch ein Segmentbild entstehen, das das Ergebnis der durchgeführten Bildverarbeitungsoperationen enthält.

2.2.3 Netzaufbau

Ein Semantisches Netz besteht aus Knoten und Relationen. Die Knoten repräsentieren einzelne Objekte einer bestimmten Szene. Stellt das zu interpretierende Bild ein Luftbild einer Landschaft dar, so können die einzelnen Landschaftsobjekte, die für das zu erreichende Ziel von Bedeutung sind, wie beispielsweise See, Wald, Straße oder Haus, jeweils mit Knoten repräsentiert werden.

Die Vernetzung der Knoten findet über Relationen statt. Jeder Knoten, der zu einem Semantischen Netz gehört, ist in diesem mit wenigstens einer Relation verbunden. Die Relationen dürfen keine Zyklen bilden. Sie beschreiben Zusammenhänge zwischen den Knoten. Dabei kann es sich sowohl um räumliche Zusammenhänge handeln als auch um die Beschreibung eines Objektes in unterschiedlichen Abstraktions- oder Kontextebenen.

Die Knoten können Attribute und Methoden enthalten, mit denen die Attribute berechnet werden können. Weiterhin können sie Funktionen zum Aufruf von Bildverarbeitungsoperationen enthalten.

2.2.4 Knoten

Es wird zwischen zwei Arten von Knoten unterschieden: den Konzeptknoten und den Instanzenknoten. Das Konzeptnetz, das aus den Konzeptknoten aufgebaut ist, repräsentiert das generische Szenenmodell. Es wird verwendet, um während der Interpretation ein Instanzennetz zu erstellen, das die untersuchte Landschaft beschreibt und das Ergebnis der Interpretation in symbolischer Form darstellt. Das Instanzennetz ist die Realisierung des Konzeptnetzes bezogen auf die Eingangsdaten. Die spezifische Realisierung eines Knotens aus dem Konzeptnetz wird als Instanz bezeichnet. Der Vorgang der Erzeugung von Instanzen wird Instanzierung genannt.

Die Instanzenknoten können vier verschiedene Zustände annehmen:

- *Hypothese*
- *partielle Instanz*
- *komplette Instanz*
- *fehlende Instanz*

Zusammen mit den Konzeptknoten gibt es insgesamt fünf unterschiedliche Knotenarten. Bei der Interpretation wird das Konzeptnetz als Vorlage für den Aufbau des Instanzennetzes verwendet. Beginnend an einer vorher definierten Stelle des Konzeptnetzes wird eine *Hypothese* instanziiert. Das bedeutet, dass ein neuer Knoten erstellt wird und den Zustand *Hypothese* erhält.

Wenn eine *Hypothese* über Bildverarbeitungsoperationen verifiziert worden ist oder alle obligatorischen untergeordneten Teilknoten den Zustand *komplette Instanz* angenommen haben, ändert sich der Zustand des Knotens von *Hypothese* zur *partiellen Instanz*.

Wenn alle obligatorischen und kontextabhängigen (siehe Abschnitt 2.2.6) untergeordneten Teilknoten den Zustand *komplette Instanz* angenommen haben, ändert sich der Zustand eines Knotens von *partieller Instanz* in *komplette Instanz*.

Wird bei der Verifikation eines Knotens durch einen Bildverarbeitungsoperator die *Hypothese* falsifiziert, so wird der Zustand des Knotens in *fehlende Instanz* geändert. Dies trifft auch auf Knoten zu, bei denen zumindest ein obligatorischer oder kontextabhängiger untergeordneter Knoten den Zustand einer *fehlenden Instanz* aufweist.

Vereinfacht ausgedrückt wird immer dann eine *Hypothese* bestätigt, wenn die untergeordneten *Hypothesen* auch bestätigt wurden. Stellt sich eine obligatorische *Hypothese* als falsch heraus, werden die übergeordneten *Hypothesen* auch falsifiziert, da sie die Bestätigung dieser *Hypothese* voraussetzen.

2.2.5 Attribute

Die Knoten eines Semantischen Netzes können Attribute enthalten. Diese werden verwendet, um die Eigenschaften der Objekte zu beschreiben. Eine Eigenschaft kann beispielsweise die Größe eines Objektes sein. Attribute können sowohl Wertebereiche als auch Einzelwerte enthalten. Die Wertebereiche dienen dabei üblicherweise vorab einer Einschränkung der möglichen Attributwerte. So kann beispielsweise die mögliche Breite einer Straße von vornherein top-down als Wertebereich präzisiert und auf diese Weise die Liste möglicher Kandidaten für eine Straße eingeschränkt werden. Die danach in der jeweiligen Bildverarbeitungsoperation aus den Rasterbildern gemessenen Attributwerte werden als Einzelwerte ebenfalls gespeichert.

Attribute beinhalten üblicherweise auch Methoden zu deren Berechnung. Es werden Methoden unterschieden, die die Attributberechnung vom übergeordneten Knoten (top-down) und von untergeordneten Knoten (bottom-up) durchführen.

2.2.6 Relationen

Die Knoten eines Semantischen Netzes sind über Relationen miteinander verbunden. Diese geben die Zusammenhänge zwischen den Knoten an.

Es werden folgende Relationen unterschieden:

- *Instance-of*: Über diese Relation werden Instanzenknoten mit Konzeptknoten verbunden. Sie stellen die einzige Verknüpfung zwischen dem Instanzennetz und dem Konzeptnetz dar.
- *Is-a*: Hierüber werden Spezialisierungen der Objekte beschrieben, wie beispielsweise „eine Kirche ist ein Gebäude“. Ein spezielleres Konzept (Kindknoten) wird auf diese Weise mit einem allgemeineren (Vaterknoten) verknüpft. Der Kindknoten erbt automatisch alle Bestandteile, Konkretisierungen, Methoden und Attribute von seinem Vaterknoten.
- *Part-of*: Objekte können aus Teilobjekten bestehen. Soll dies im Semantischen Netz beschrieben werden, so wird die *part-of* Relation verwendet. Auf diese Art und Weise kann das Problem der Erkennung eines ganzen Objektes auf die Erkennung seiner Teilobjekte zurückgeführt werden. *Part-of* Relationen enthalten Angaben für die minimale und maximale Anzahl der erlaubten Relationen. Unterscheiden sich die Werte für Minimum und Maximum, beschreibt die Differenz die Anzahl der *optionalen Relationen*.
- *OptPart-of (OptionalPart-of)*: Über diese Relation können Objektteile beschrieben werden, die vorhanden sein können, aber für die Identifizierung des Objektes als solches nicht notwendig sind. In der Interpretation gehören Knoten, die über diese Relation verbunden sind, nicht zu den obligatorischen Teilen, die vorhanden sein müssen, damit ein Objekt erkannt wird. Eine *optionale part-of* Relation kann auch über die Bereichsangaben in der *part-of* Relation selbst beschrieben werden.
- *Concrete-of (Con-of)*: Diese Relation beschreibt die Konkretisierung eines Objektes. Dies wird dann benötigt, wenn ein Objekt in unterschiedlichen Abstraktionsebenen dargestellt werden soll. Auf diese Weise kann eine Verbindung zwischen den Knoten der semantischen Beschreibung eines Objektes und jenen der Beschreibung seiner sensorischen Abbildung durchgeführt werden. Ein Objekt kann sich in einem Sensor anders darstellen als in einem anderen. Dies kann durch unterschiedliche Konkretisierungen des Objektes repräsentiert werden.
- *Attributierte Relation*: Über diese Relationen werden geometrische Beziehungen zwischen Objekten beschrieben. So kann beispielsweise über eine solche Relation die räumliche Nachbarschaft zweier Objekte repräsentiert werden. Während alle anderen Relationen eine Hierarchie in die Objektbeschreibung bringen und diese vertikal verbinden, verknüpfen die *attributierten Relationen* sich in der gleichen Hierarchiestufe befindende Objekte horizontal. In Abschnitt 3.2.2.9.1 werden attributierte Relationen zur Beschreibung räumlicher Beziehungen vorgeschlagen.
- *CdPart-of, CdCon-of, CdAttributet Relation (ContextDependent...)*: Über die *kontextabhängigen Relationen* kann festgelegt werden, dass nach bestimmten Objekten erst dann gesucht wird, wenn andere schon gefunden worden sind. So werden zuerst alle nicht *kontextabhängigen* Teile instanziiert. Wurden diese für ein Objekt gefunden, ändert sich der Zustand in *partielle Instanz* (siehe Abschnitt 2.2.4). Somit ist ein bestimmter Kontext etabliert. Erst danach wird nach den *kontextabhängigen* Teilen und Konkretisierungen gesucht. Dies kann dann von Bedeutung sein, wenn einige Sensoren erst ausgewertet werden können, wenn andere schon analysiert sind.
- *Data-of*: Die extrahierten Objekte und/oder ihre Merkmale werden über diese Relation verknüpft.

2.2.7 Regeln

Das prozedurale Wissen über die Steuerung der Interpretation wird im verwendeten System mit Hilfe eines Regelsatzes repräsentiert. Der Regelsatz erlaubt eine Verarbeitung des Faktenwissens der Semantischen Netze, ohne dass deren Wissensinhalte von Bedeutung sind. Dies hat zur Folge, dass der gleiche Regelsatz und damit das Steuerungswissen für die Interpretation auch angewendet werden kann, wenn der Wissensinhalt der Semantischen Netze ausgetauscht wird.

Jede Regel besteht aus einem Bedingungsteil und einem Aktionsteil. Es wird jeweils überprüft, ob der Bedingungsteil einer Regel erfüllt ist. Trifft dies zu, wird der Aktionsteil ausgeführt.

Die Regeln überprüfen im Semantischen Netz Bedingungen, die sich auf das Vorhandensein bestimmter Interpretationszustände von Knoten und von Nachbarknoten, die über bestimmte Relationen verbunden sind, beziehen. Ist die jeweilige Bedingung erfüllt, werden entweder neue Instanzen gebildet oder es wird der jeweilige Interpretationszustand modifiziert.

Eine Regel kann zum Beispiel folgendermaßen aussehen:

Bedingungsteil (wenn): Zustand des Knotens: *Hypothese* und Zustand aller obligatorischen, nicht kontextabhängigen untergeordneten Knoten: *Komplette Instanz*

Aktionsteil (dann): Modifizierung des Knotenzustandes in: *Partielle Instanz*

Diese Regel ist logisch nachvollziehbar, da sie nichts anderes besagt, als dass ein Objekt als teilweise erkannt gilt, wenn alle seine kontextunabhängigen obligatorischen Teilobjekte gefunden wurden. Eine weitere Regel lautet, dass ein Objekt als vollständig erkannt gilt, wenn alle seine obligatorischen Teile (sowohl kontextunabhängig als auch kontextabhängig) erkannt sind.

Jeder Regel im Regelsatz wird eine Priorität zugeordnet. Dies ist von Bedeutung, da in einem Interpretationszustand des Systems die Möglichkeit besteht, dass der Bedingungsteil mehrerer Regeln zutrifft. Ausgeführt werden kann jedoch immer nur eine Regel gleichzeitig. In die Entscheidung, welche Regel zur Ausführung kommt, wird die Priorität mit einbezogen. Näheres dazu siehe im nächsten Abschnitt.

2.2.8 Steuerung der Interpretation

Die Steuerung der Interpretation wird nach dem Prinzip einer Inferenzmaschine durchgeführt. Dieses basiert auf einem sich zyklisch wiederholenden Prozess der Auswahl von Regeln und deren Ausführung.

Bei Anwendung der Regeln wird das verwendete Konzeptnetz mit dem Instanzennetz, das den aktuellen Interpretationszustand darstellt, verglichen. Darauf basierend werden neue Hypothesen instanziiert oder es erfolgt eine Modifikation der jeweiligen Interpretationszustände, je nachdem, wie Bedingungsteil und Aktionsteil der Regeln lauten.

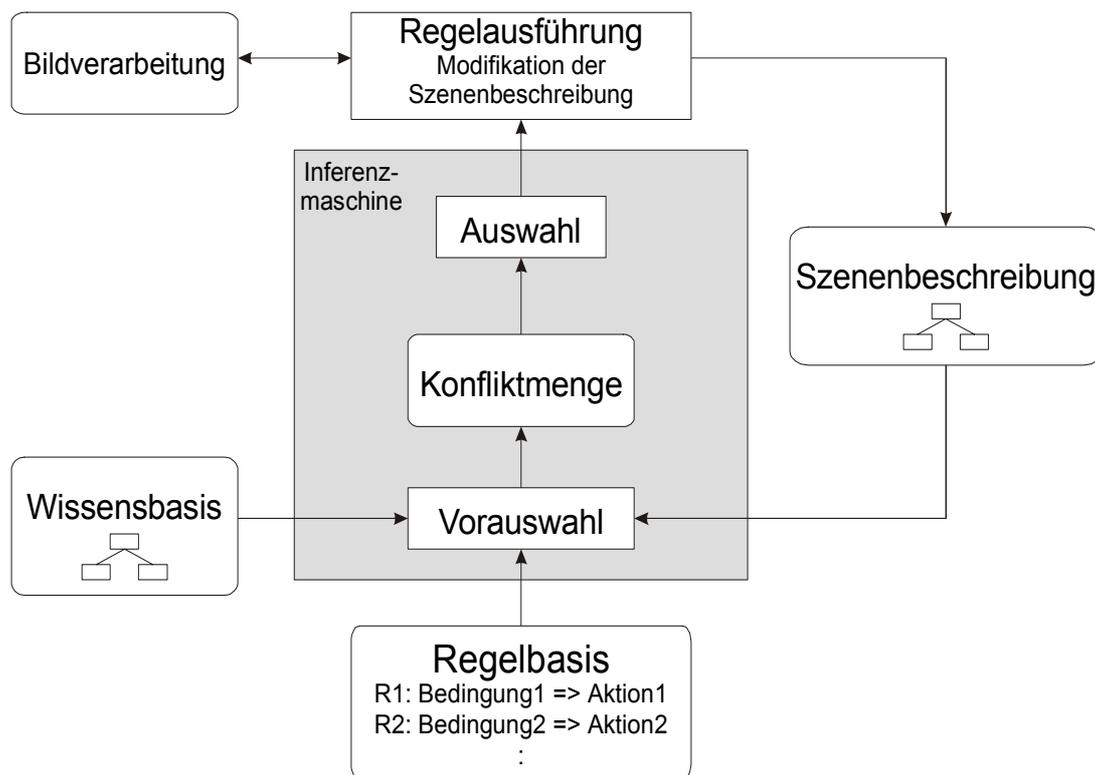


Abbildung 3: Interpretationssteuerung im wissensbasierten System

Die Inferenzmaschine in der Interpretationssteuerung überprüft für alle Regeln, ob deren Bedingungsteil erfüllt ist. Ist dies der Fall, wird die Regel einer sogenannten Konfliktmenge zugeführt. Da für einen Interpretationszustand die Regelauswahl mehr als eine Regel zum Ergebnis haben kann, besteht die Konfliktmenge oftmals aus mehreren Regeln. Daher kommt auch der Name, da für alle diese Regeln der Bedingungsteil erfüllt ist, aber wegen der sequentiellen Verarbeitung nur eine ausgeführt werden kann, und dies zum Konflikt zwischen den Regeln führt. Die Regeln, die der Konfliktmenge zugeführt worden sind, werden auch instanziierte Regeln genannt.

Die Entscheidung, welche Regel ausgeführt wird, erfolgt dadurch, dass den Regeln Prioritäten zugeordnet werden. Sie werden danach sortiert und ausgeführt. Eine Priorität wird u.a. daraus ermittelt, auf welchen Knoten die Regel zutrifft. Es wird versucht, zunächst Knoten, die gegenüber den zuletzt bearbeiteten untergeordnet sind, im Instanzennetz zu entwickeln. Bei gleichen Prioritäten werden a priori festgelegte Zweitprioritäten für die Regeln verwendet.

Über die a priori Festlegung des verwendeten Regelsatzes und der Prioritäten der einzelnen Regeln kann der Interpretationsverlauf beeinflusst und auf diese Weise die Interpretationsstrategie bestimmt werden. In

Abbildung 3 ist der Steuerungsablauf der Interpretation dargestellt.

Aus der Zusammenstellung einzelner Regeln können Strategien erstellt werden. In ihnen sind die einzelnen Regeln je nach Zielsetzung unterschiedlich gewichtet. So existieren beispielsweise Strategien, die primär top-down oder bottom-up arbeiten.

2.2.9 Suchbäume

Während einer Interpretation kann es vorkommen, dass aus dem aktuellen Interpretationszustand (dem aktuellen Instanzennetz) statt einer Hypothese mehrere folgen. Wenn diese Hypothesen sich widersprechen und miteinander nicht vereinbar sind, entstehen konkurrierende Hypothesen.

Angenommen, in einem Konzeptnetz wurde festgelegt, dass sowohl ein Haus ein Gebäude sein kann als auch eine Kirche (die Knoten *Haus* und *Kirche* sind über eine *is-a* Relation mit dem Knoten *Gebäude* verknüpft, siehe Abbildung 4). Ist der Interpretationszustand im Stadium Z1, in dem die Hypothese *Gebäude* aufgestellt wurde, so wird im nächsten Schritt top-down weiterpropagiert. Da in diesem Beispiel die Spezialisierung von *Gebäude* entweder *Haus* oder *Kirche* sein kann, jedoch nicht beides gleichzeitig, entstehen zwei konkurrierende Hypothesen (Zustände Z2.1 und Z2.2). Da in diesem Stadium der Interpretation noch nicht abzusehen ist, welche der beiden Hypothesen zutreffen, werden beide parallel weiterverfolgt. Um unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten in geeigneter Weise verfolgen zu können, wird das Modell eines Suchbaumes verwendet.

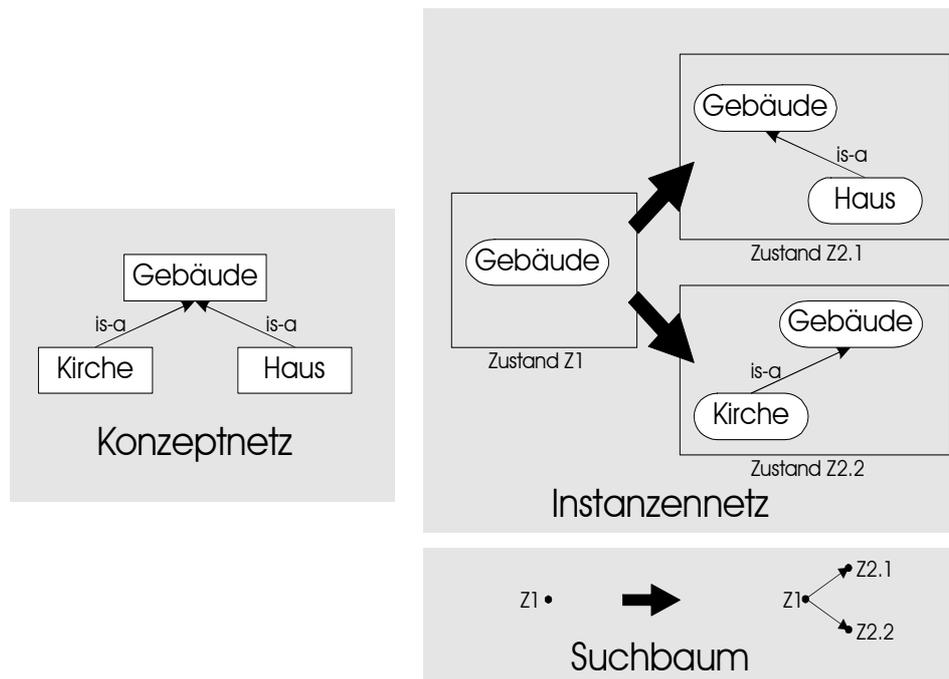


Abbildung 4: Beispiel für konkurrierende Hypothesen

Ein Suchbaum besteht ebenfalls aus Knoten, die miteinander verknüpft sind. Er ist jedoch nicht mit einem Konzept- oder Instanzennetz zu verwechseln. Die Knoten in einem Suchbaum repräsentieren Interpretationsstadien. Am Anfang einer Interpretation besteht ein Suchbaum aus einem einzigen Knoten. Dieser Zustand bleibt so lange bestehen, bis an einem Punkt der Interpretation konkurrierende Hypothesen entstehen. In diesem Fall teilt sich der Suchbaumknoten in mehrere auf, je nach Anzahl der konkurrierenden Hypothesen. Wenn im weiteren Verlauf der Interpretation wieder mehrere konkurrierende Hypothesen auftreten, geschieht das gleiche. Auf diese Weise kann sich der Suchbaum immer weiter ausweiten. In Abbildung 4 ist die Ausweitung anhand des obigen Beispiels dargestellt.

Durch Suchbäume kann das System unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten handhaben. Da das System die unterschiedlichen Interpretationsmöglichkeiten nicht parallel verfolgen, sondern jeweils nur einer Hypothese nachgehen kann, ist es von Bedeutung, in welcher Reihenfolge die Auswahl der Hypothesen erfolgt, wenn sich der Suchbaum aufspaltet.

Wenn jeder Suchbaumknoten einen Interpretationszustand repräsentiert, so kann bei einem eindeutigen Ergebnis ein Suchbaumknoten als Zielknoten bestimmt werden. Er repräsentiert das Ziel der Interpretation. Das primäre Interpretationsziel besteht darin, vom Startknoten überhaupt den Zielknoten zu erreichen. Wird obige Einschränkung, dass das System mehrere konkurrierende Lösungsansätze nicht parallel verfolgen kann und die Tatsache, dass sich ein Suchbaum sehr stark ausweiten und die Interpretationen mit aufwendigen Bildverarbeitungsoperationen zeitintensiv sein kann, in die Überlegung einbezogen, so ergibt sich als sekundäre Zielsetzung, möglichst direkt das Interpretationsziel zu erreichen.

In [45] werden vier Verfahren genannt, nach denen ein Suchbaum abgearbeitet werden kann:

- Der Suchbaum wird vollständig aufgebaut. Alle Möglichkeiten, die sich während der Interpretation ergeben, werden weiterverfolgt.
- Es wird eine Tiefen-Suche durchgeführt. Bei einer Aufspaltung des Suchbaumes wird jeweils nur der Knoten weiterverfolgt, der am erfolgversprechendsten ist. Der Suchbaum wird auf diese Art und Weise so lange entwickelt, bis sich ggf. zeigt, dass der Weg nicht zur gewünschten Lösung führt. Dann wird zum zuletzt nicht weiterverfolgten Suchbaumknoten zurückgesprungen und dieser in gleicher Weise weiterentwickelt. Dies wird so lange fortgesetzt, bis das gewünschte Ziel erreicht ist.
- Es wird eine Breiten-Suche durchgeführt. Dabei werden im Suchbaum bei einer Aufspaltung immer alle konkurrierenden Suchbaumknoten entwickelt, bevor weiter in die Tiefe gegangen wird. Der Suchbaum wird damit zuerst jeweils in der Breite entwickelt, bevor eine Stufe in die Tiefe gegangen wird. Dies wird so lange fortgesetzt, bis der Zielknoten erreicht ist.
- Eine häufige Anwendung findet die Suche nach dem A*-Algorithmus [57]. Hierbei wird für jeden entwickelten Suchbaumknoten eine Schätzung durchgeführt, wie hoch die minimalen Kosten k für den Weg vom Start zum Ziel über den aktuellen Knoten im Suchbaum sind. Dafür werden jeweils die bis zum aktuellen Suchbaumknoten angefallenen Kosten berechnet, zusammen mit einer Schätzung für die Restkosten zum Ziel. Die Gesamtkosten setzen sich aus diesen beiden Komponenten zusammen. Als Bedingung für die erfolgreiche Anwendung dieses Verfahrens gilt, dass die Schätzung der Restkosten optimistisch gegenüber den tatsächlichen Restkosten sein muss ([64]:109ff). Im Suchbaum wird immer der Knoten weiterentwickelt, der nach obiger Abschätzung die geringsten Kosten verursacht, und daher am vielversprechendsten ist. Die Güte dieser Vorgehensweise hängt primär von den Schätzmethoden ab. Da bei diesem Verfahren mit einer höheren Wahrscheinlichkeit direkter auf das Ziel hingearbeitet wird, als bei einer systematischen Überprüfung aller Möglichkeiten, ist es für eine effiziente Suche eher geeignet als die anderen Verfahren.

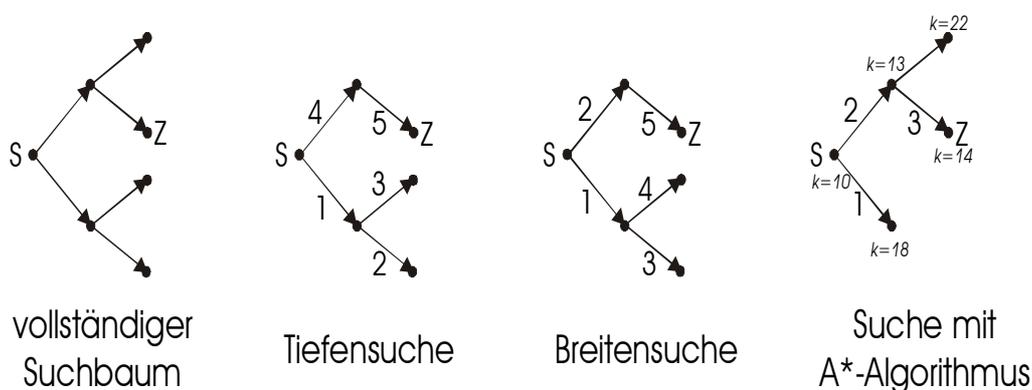


Abbildung 5: Möglichkeiten der Interpretationsreihenfolgen im Suchbaum

In Abbildung 5 sind beispielhaft Start- und Zielknoten für die beschriebenen Verfahren zusammen mit der Reihenfolge, in der die Suchbaumknoten abgearbeitet werden, dargestellt. In der rechten Abbildung sind zusätzlich beispielhaft die Werte für die Kostenfunktion abgebildet. Hierbei wird der Startknoten S über die Schritte 1 und 2 weiterentwickelt. Daraufhin wird der Knoten mit dem Kostenfunktionswert $k=13$ weiterentwickelt, da die Kosten niedriger sind als beim Knoten mit $k=18$ und die Erfolgssaussichten daher höher liegen.

Das Ziel einer Interpretation kann im genutzten wissensbasierten System derart festgelegt werden, dass ein Knoten im Konzeptnetz als Zielkonzept festgelegt wird. Bei der Interpretation gilt das Ziel dann als erreicht, wenn dieses Zielkonzept vollständig instanziiert worden ist. Ist kein Zielkonzept vorgegeben, so wird so lange weiter instanziiert, bis keine Regeln mehr angewendet werden können. Der Zustand gilt dann als Zielzustand.

Das für diese Arbeit genutzte wissensbasierte System verwendet die oben beschriebenen Suchbäume. Als Methode, die Interpretationsreihenfolge im Suchbaum zu bestimmen, wird der beschriebene A*-Algorithmus genutzt.

2.2.10 Implementierung

Die Implementierung des Systems erfolgte objektorientiert in C++. Alle Knoten, Relationen und Regeln bestehen aus eigenen Klassen. Gesteuert wird der Interpretationsablauf über das Softwarepaket Tcl/Tk, zu dem die in C++ programmierten Module eine Schnittstelle haben. Eine graphische Benutzerschnittstelle (GUI) wurde ebenfalls unter Tcl/Tk erstellt.

Tcl/Tk [58] ist ein Software-Paket, das aus einem Interpreter besteht und zur Entwicklung graphischer Benutzerschnittstellen geeignet ist. Es ist frei erhältlich und wurde auf die meisten Computerplattformen adaptiert. Da C++-Compiler auch auf den meisten Plattformen existieren, kann das wissensbasierte System AIDA ohne größeren Aufwand auf andere Betriebssysteme angepasst werden. Entwickelt und genutzt wird das System aktuell jedoch auf Unix-Ebene unter den Sun-Betriebssystemen SunOS/Solaris.

Der Netzaufbau und die Implementierung von Prozeduren, die Berechnungen durchführen oder auf andere Systeme zugreifen, erfolgt von der Anwenderseite her komplett in Tcl/Tk-Skripten.

3 *Aufbau und Strategie einer Interpretation mit Semantischen Netzen*

Die in dieser Arbeit verwendete Methode der wissensbasierten Interpretation nutzt Semantische Netze zur Wissensrepräsentation. Die bislang zu diesem Ansatz durchgeführten Arbeiten (z.B. [21] [69]) beschäftigten sich in erster Linie mit der methodischen Entwicklung bzw. Weiterentwicklung des Systems. So wurden beispielsweise die unterschiedlichen Knoten- und Kantentypen weiterentwickelt und das System um Mechanismen zur Steuerung der Interpretation erweitert. Damit wurden Werkzeuge zum Aufbau des generischen Szenenmodells bereitgestellt. Anwendungen werden dabei jedoch primär zur Demonstration der entwickelten Strategien verwendet.

Im Gegensatz dazu besteht die Hauptaufgabe bei der Erstellung eines anwendungsspezifischen Interpretationssystems jedoch darin, das generische Szenenmodell (Konzeptnetz) und damit die Wissensbasis sowie die zugehörige Interpretationsstrategie zu erstellen. Die Wissensbasis soll den Bereich der Landschaft beschreiben, der für die Interpretation im Hinblick auf das verfolgte Ziel von Bedeutung ist. Hierfür sind Strategien notwendig, die sowohl die Erstellung der Konzeptnetze betreffen als auch die Gesamtstrategie der Interpretation (z.B. top-down oder bottom-up). Zum Aufbau von Strategien zur Interpretation von Landschaften wurden bislang nur sehr grundlegende Konzepte dargestellt. Daher erfordert das Konzipieren der generischen Szenenmodelle für angemessene Problemlösungen neben dem Expertenwissen viel Erfahrung.

In diesem Kapitel wird ein allgemeines Konzept zur Interpretation von Fernerkundungsdaten aufgezeigt. Dabei werden Strategien zum möglichen Aufbau von Semantischen Netzen für unterschiedliche Problemstellungen beschrieben. Es werden somit Vorschläge zur Lösung unterschiedlicher Fragestellungen gemacht. Die Strategien aus diesem Kapitel dürfen jedoch nicht als die alleinigen oder optimalen Lösungen des jeweiligen Problems angesehen werden. Oftmals lässt sich durch manuelle Optimierung der Netze im Hinblick auf die jeweiligen Problemstellungen die Effizienz und die Güte der Interpretation verbessern.

Nachdem in Abschnitt 3.1 zwei Segmentierungsstrategien aufgezeigt werden, wird in Abschnitt 3.2 auf die symbolische Beschreibung von Landschaften (monotemporal) und damit auf die High-Level-Verarbeitung der Interpretation eingegangen. Daraufhin wird in Abschnitt 3.3 die für eine Interpretation notwendige Low-Level-Verarbeitung beschrieben. Konkret werden Operatoren vorgestellt, welche die durch die symbolische Verarbeitung aufgestellten Hypothesen in den Bilddaten verifizieren können. In Abschnitt 3.4 wird für eine der vorher beschriebenen Strategien, die wichtig für die Interpretation im Bereich von Vegetation ist, eine Anwendung dargestellt. Schließlich werden in Abschnitt 3.5 Strategien zur multitemporalen Interpretation beschrieben.

Die dargestellten Semantischen Netze eignen sich direkt nur zur Verwendung im Zusammenhang mit dem System AIDA. Die Strategien sollten jedoch übertragbar sein, eventuell mit einer anderen Syntax.

3.1 *Segmentierungsstrategien*

Im vorliegenden System können für eine Interpretation zwei Hauptkomponenten unterschieden werden:

- Die High-Level-Verarbeitung: In dieser Komponente befindet sich die symbolische Verarbeitung der wissensbasierten Interpretation unter Verwendung von Semantischen Netzen. Ausgehend von einem Konzeptnetz mit der Beschreibung der jeweils relevanten Teile der Landschaft wird im Verlauf der Interpretation ein Instanzennetz mit der Beschreibung der zu untersuchenden Szene erstellt.
- Die Low-Level-Verarbeitung: Mit Bildverarbeitungsoperatoren werden Hypothesen aus der High-Level-Verarbeitung verifiziert. Es können Merkmale analysiert, Segmente extrahiert oder weitere Operationen durchgeführt werden. Die Operatoren greifen direkt auf die Rasterbilder zu.

In Abhängigkeit davon, wie diese Komponenten miteinander gekoppelt sind und in welcher Reihenfolge die Operationen ausgeführt werden, sollen hier zwei Strategien zur Interpretation unterschieden werden:

- Initialsegmentierung
- Dynamische Segmentierung.

Eine Mischform aus beiden Strategien ist möglich. Wie die Strategien aussehen und für welche Fälle sie sich primär eignen, soll im Folgenden dargestellt werden.

Initialsegmentierung

Bei dieser Strategie wird eine Initialsegmentierung der Interpretation vorangestellt. Die entstehenden Segmente können flächenförmig oder linienförmig sein. Eine gleichzeitiges Auftreten beider Formen ist auch möglich. Die Primitive, die in diesem Schritt entstehen, bilden die kleinste Unterteilung im Rasterbild. Wie in Abbildung 6 dargestellt, wird für jedes der extrahierten Segmente eine bestimmte Anzahl von Merkmalen berechnet. Das Ergebnis dieser Schritte ist eine Menge von n Segmenten mit jeweils m Merkmalen¹, die den Input für die wissensbasierte Interpretation bildet.

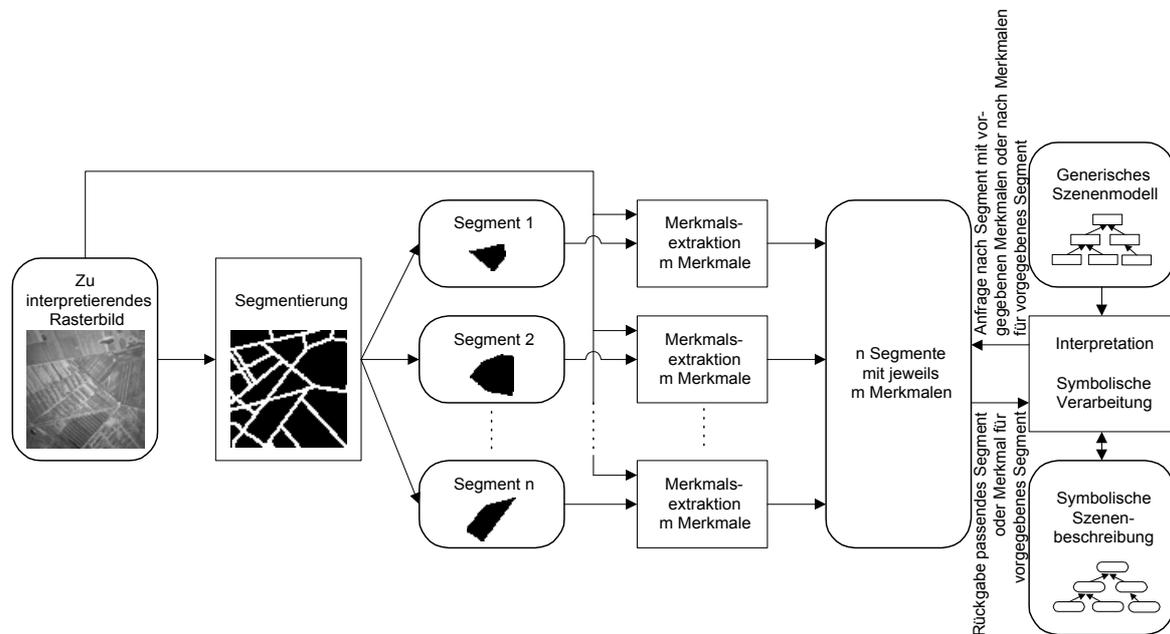


Abbildung 6: Interpretationsstrategie mit Initialsegmentierung

In Abhängigkeit vom Konzeptnetz wird eine symbolische Szenenbeschreibung aufgebaut. Wenn während der Interpretation eine Hypothese verifiziert werden muss, wird eine Anfrage an die vorab erstellte Menge der Segmente und Merkmale gestellt. Im Falle des Vorhandenseins der angefragten Segmente werden diese übergeben. Während der Interpretation mit der Inferenzmaschine erfolgt kein direkter Zugriff mehr auf das Rasterbild.

Dynamische Segmentierung

Die Verarbeitungsstruktur bei der dynamischen Segmentierung ist in Abbildung 7 dargestellt. Im Gegensatz zur Strategie mit der Initialsegmentierung wird hier keine Segmentierung oder Merkmalsextraktion vor der symbolischen Verarbeitung durchgeführt. Erst im Verlauf der Interpretation werden bei Bedarf Operatoren aufgerufen, die jeweils Segmente extrahieren und/oder Merkmale dazu bestimmen. Dabei wird vom Interpretationsmodul eine Anfrage an den jeweiligen Operator mit einschränkenden Parametern gestellt. Daraufhin greift der jeweilige Bildverarbeitungsoperator auf das Rasterbild zu, extrahiert die gewünschten Segmente und/oder Merkmale und liefert das Ergebnis der Operation zurück.

Die Vor- und Nachteile der beiden Strategien hängen primär von der konkreten Anwendung ab. Die Interpretation mittels Initialsegmentierung ist dann vorteilhaft, wenn folgende Bedingungen gelten:

- Methode und Parameter der Segmentierung stehen vor der Interpretation fest.
- Die zu interpretierenden Segmente stellen einen hohen Anteil der gesamten Segmente dar.
- Die Berechnung aller voraussichtlich benötigten Merkmale zu allen Segmenten stellt keinen erheblich höheren Rechenaufwand gegenüber den jeweils benötigten Merkmalen dar. Dies bedeutet, dass, wenn für jeden Interpretationsschritt voraussichtlich die meisten Merkmale zu berechnen sind und/oder die Berechnung der Merkmale keinen hohen Rechenaufwand erfordert, eine vorherige Berechnung vorteilhaft ist.

¹ Gilt nicht für das gleichzeitige Auftreten beider Formen. In dem Fall kann sich eine unterschiedliche Anzahl von Merkmalen für die Segmente ergeben.

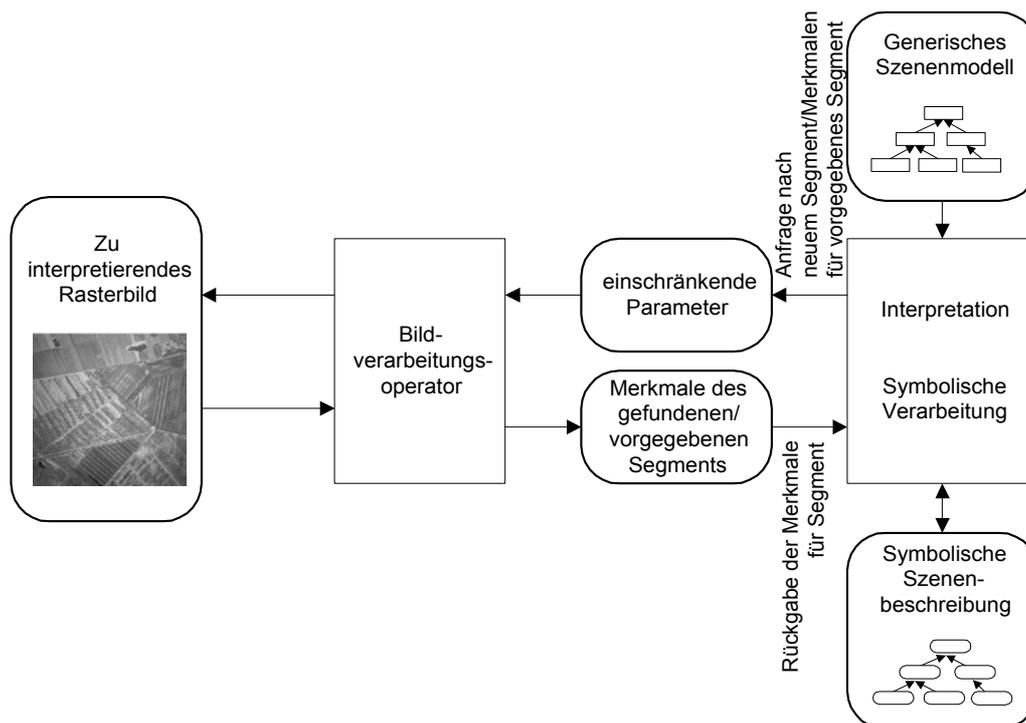


Abbildung 7: Interpretationsstrategie mit dynamischer Segmentierung

Die Bedingungen, die eine Strategie mittels dynamischer Segmentierung notwendig machen, lauten:

- Die zu verwendenden Segmentierungsmethoden und die Parameter für ihre Ansteuerung ergeben sich erst im Verlauf der Interpretation und können daher nicht initial bestimmt werden. Die Objektgrenzen ergeben sich dadurch erst während der Interpretation.
- Der Anteil des zu interpretierenden Gebietes am gesamten Testgebiet ist gering oder vorher geometrisch nicht genau festzulegen.
- Die Merkmale, die voraussichtlich zu berechnen sind, sind sehr rechenaufwendig und eignen sich daher nur in geringem Maße dazu, für alle möglichen Segmente initial berechnet zu werden.

Je nach dem, welche Bedingungen für den jeweiligen Fall überwiegend gelten, ist die eine oder die andere Strategie vorzuziehen. Die Interpretation mittels Initialsegmentierung hat bei Vorliegen der entsprechenden Bedingungen den Vorteil, dass durch die Trennung zwischen der Bildverarbeitung und der Interpretation die Bildverarbeitung jeweils für das gesamte Bild durchgeführt und aufgrund dessen optimiert werden kann. Dies führt zu einem Performancegewinn. Die vorhandenen Segmente werden mit ihren Merkmalen als Instanzen der Datenknoten am Anfang der Interpretation in das Semantische Netz eingefügt und im Verlauf der Interpretation aufgerufen.

Ist dagegen die erste Bedingung für die Strategie mittels dynamischer Segmentierung erfüllt, kann nur diese verwendet werden. Die Erstellung und Bindung der Datenknoten, die einer Segmentextraktion entspricht, erfolgt erst im Verlauf der Interpretation.

Eine Mischform aus diesen beiden Strategien ist beispielsweise dann sinnvoll, wenn am Anfang die Objektgrenzen festgelegt sind und somit eine Initialsegmentierung durchgeführt werden kann, jedoch die Berechnung der Merkmale relativ rechenaufwendig ist und sich einige Parameter dazu erst im Verlauf der Interpretation ergeben. In einem derartigen Fall kann eine Initialsegmentierung vor der High-Level-Interpretation durchgeführt werden. Die Abfrage der Merkmale kann dann jedoch im Verlauf der Interpretation durchgeführt werden

3.2 Symbolische Beschreibung von Landschaften

Um eine Interpretation von Landschaften durchführen zu können, muss der für die Aufgabenstellung relevante Teil in geeigneter Form in ein Konzeptnetz abgebildet werden. Dieses wird dann verwendet, um durch eine symbolische Verarbeitung die Wissensinhalte miteinander in geeigneter Weise zu verknüpfen und daraus Hypothesen abzuleiten, die in den zu interpretierenden Bilddaten überprüft werden. Im Folgenden werden Strategien zum Aufbau der Konzeptnetze aufgezeigt.

3.2.1 Beschreibungsebenen

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, beim Aufbau eines Konzeptnetzes eine Unterteilung in mehrere Ebenen durchzuführen. Mehrere Knoten sollten jeweils zu einer Ebene gruppiert werden. Innerhalb einer Ebene beschreiben die Knoten die zu untersuchenden Objekte im gleichen Kontext. Dies bedeutet, dass beispielsweise bei einer Beschreibung eines Objektes auf einer Rasterbildebene ein Knoten, der sich in der gleichen Ebene befindet, nicht ein 3D-Objekt beschreiben sollte. Dies setzt sich bei der Beschreibung der Attribute fort. Sie sollten auch jeweils an den Kontext der Ebene angepasst sein. Beim Übergang von einer Ebene zu einer anderen müssen die Attributwerte jedoch transformiert werden (beispielsweise von 3D-Oberfläche zu 2D-Fläche).

Das die Szene repräsentierende Semantische Netz ist in der Regel so aufgebaut, dass von oben nach unten hin eine stärkere Detaillierung und Konkretisierung der Objekte erfolgt. Darauf basierend werden horizontale und vertikale Ebenen unterschieden. Die Objekte in einer horizontalen Ebene befinden sich auf der gleichen Konkretisierungsstufe, können jedoch unterschiedliche Detaillierungsstufen aufweisen. Die Objekte, die sich in der gleichen vertikalen Ebene befinden, können unterschiedliche Konkretisierungs- und Detaillierungsstufen beinhalten, haben jedoch einen anderen gemeinsamen Kontext. Dies kann beispielsweise der zeitliche Kontext sein. Die horizontalen und vertikalen Ebenen können einander überschneiden, so dass Objekte sich sowohl in einem horizontalen als auch in einem vertikalen Kontext befinden können.

Es sollen folgende Ebenen unterschieden werden (siehe auch [69]):

Horizontal:

- Szenenebene
- 3D-Objektebene
- Sensorebenen
- GIS-Ebene
- Kartenebenen

Vertikal:

- Temporale Ebene
- Auflösungsebene

Szenenebene

Diese Ebene beschreibt die betrachteten Objekte und Objektteile in der abstraktesten Weise. Die Objekte werden in ihrer hochsprachlichen allgemeinen Beschreibung dargestellt. Es erfolgt auf dieser Ebene keine Beschreibung zur dreidimensionalen Ausprägung oder der Abbildung in einem Sensorbild.

3D-Objektebene

In dieser Ebene wird die 3D-Ausprägung der Objekte dargestellt. Ausgehend von der Szenenebene kann diese Ebene die Ausgangsbasis zur Abbildung eines Objektes in verschiedene Sensoren bilden. Mit dem Wissen über die geometrischen Zusammenhänge zwischen dem jeweiligen 3D-Objekt und den unterschiedlichen Sensoren ist auf diese Weise bei Vorhandensein genügender Sensorinformationen eine Rekonstruktion oder Teilrekonstruktion der jeweiligen Objekte möglich.

Sensorebene

In dieser Ebene wird das Ergebnis der Abbildung eines Objektes in ein bestimmtes Sensorbild dargestellt. Grundlage der Objektbeschreibung sind zweidimensionale Rasterbilder. Diese Ebene befindet sich auf der untersten Konkretisierungs- und Detaillierungsebene des Konzeptnetzes. Daher sind an den Knoten in dieser Ebene in der Regel Bildverarbeitungsoperatoren gekoppelt, die aufgestellte Hypothesen auf der Rasterbildebene zu verifizieren haben. Es ist zweckmäßig, alle verwendeten Sensorbilder zueinander in eine feste geometrische Beziehung zu setzen, damit bei der Bearbeitung der Segmente auf die gleichen Orte zurückgegriffen werden kann. Dies kann beispielsweise durch eine Georeferenzierung der Bilder oder durch eine Entzerrung aufeinander geschehen.

GIS-Ebene

Die Beschreibung von Objekten aus Geoinformationssystemen, wie z.B. aus dem ATKIS-Basis-DLM [23] oder aus fachspezifischen Systemen, erfolgt in dieser Ebene. Dies ist in einer Interpretationsstrategie dann von Bedeutung, wenn solche Daten beispielsweise als Initialinformation zur Extraktion bestimmter Objekte verwendet werden sollen.

Kartenebene

Die Kartenebene dient der Repräsentation der Objekte in Karten. Dies können beispielsweise Topographische Karten oder auch fachspezifische sein. Ist die repräsentierte Karte aus GIS-Daten erstellt worden, so sollten diese direkt in der GIS-Ebene verwendet werden, da sie dort direkt vorliegen und nicht erst aus den Rasterdaten rekonstruiert werden müssen. Zur Interpretationsstrategie kann die Bedeutung der Karten, ähnlich wie in der GIS-Ebene, zum einen darin liegen, Initialbeschreibungen zur Interpretation zu gewinnen, oder aber Zusatzinformationen zur Interpretation zu erhalten.

Temporale Ebene

In der temporalen Ebene werden die Objekte beschrieben, die sich auf bestimmte Zeitpunkte beziehen. Hierbei kann es sich beispielsweise um verschiedene Jahreszeiten handeln, zu denen die gleichen Objekte ein unterschiedliches Aussehen haben können ([47]:163ff). Für eine Objektbeschreibung kann auf diese Weise in Abhängigkeit von der Jahreszeit ein anderes Beschreibungsmodell verwendet werden, so dass die Interpretation die veränderten Ausprägungen berücksichtigen kann. Eine weitere Möglichkeit besteht in der multitemporalen Interpretation, in der Veränderungen von Objekten betrachtet werden.

Auflösungsebene

Das generische Szenenmodell, das für die Beschreibung von Objekten aufzustellen ist, wird sich in Abhängigkeit von der verwendeten Auflösungsstufe der Sensorabbildungen unterscheiden. In dieser Ebene wird daher der Teil des Konzeptnetzes, der die Szene innerhalb einer Auflösungsstufe beschreibt, dargestellt. Während innerhalb der oberen horizontalen Ebenen die Modellbeschreibungen für unterschiedliche Auflösungen gleich sind, erfolgt die Unterscheidung nach unten hin immer stärker, insbesondere in den Sensorebenen. Existieren Abbildungen von Objekten in mehreren Auflösungsstufen, können diese parallel verwendet werden, um mehr Evidenz für die Hypothesen zur Existenz eines Objektes zu erhalten. Unterschiedliche Auflösungsebenen werden beispielsweise in [7] verwendet, jedoch nicht zur expliziten Wissensrepräsentation, die zur Interpretation verwendet wird, sondern implizit in den beschriebenen Verfahren.

3.2.2 Objektbeschreibung

In diesem Abschnitt soll ein Konzept zum Aufbau einer Objektbeschreibung im Semantischen Netz vorgestellt werden. Sie stellt zusammen mit dem jeweiligen Regelsatz eine Strategie zur Erkennung des jeweiligen Objektes in Sensordaten dar.

Abbildung 8 zeigt die Objektbeschreibung bis hin zu den Sensorebenen. Auf oberster Ebene, in der Szenenebene, wird das jeweilige Objekt in seiner hochsprachlichen Beschreibung dargestellt. Nach unten hin folgt die Aufteilung in die einzelnen Bestandteile des jeweiligen Objektes. Diese Aufteilung erfolgt so lange, bis auf der hochsprachlichen Ebene eine je nach Problemstellung ausreichend detaillierte Beschreibung (siehe Abschnitt 3.2.2.1) der Objektteile erreicht worden ist. Diese Objektteile sollen als Primitive der Szenenebene bezeichnet werden.

Die Konkretisierung der Primitive der Szenenebene ist die 3D-Beschreibung in der 3D-Ebene. Wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt, wird in dieser Ebene der 3D-Körper des Objektes beschrieben. Auf diese Art und Weise wird der logische Übergang von der hochsprachlichen Beschreibung zu den Sensorabbildungen erreicht. Die Verwendung dieser Ebene ist dann nützlich, wenn für die bearbeitete Fragestellung der 3D-Körper der Objekte von Bedeutung ist (z.B. 3D-Rekonstruktion). Falls diese Ebene aufgrund der bearbeiteten Fragestellung nicht benötigt wird, kann sie auch weggelassen und aus der Szenenebene heraus übersprungen werden.

Wie bereits dargestellt erfolgt von diesem Punkt aus die Konkretisierung in die unterschiedlichen Sensoren. Hier findet in der Regel der Übergang vom 3D-Objekt in eine 2D-Abbildung statt. Dargestellt ist die Konkretisierung in die Sensor1-Ebene, in der die Abbildung des Objektes beschrieben ist. Diese Abbildung kann nun seinerseits in einzelne Bestandteile aufgegliedert werden. Auf unterster Stufe werden die Primitive der jeweiligen Sensorebene beschrieben.

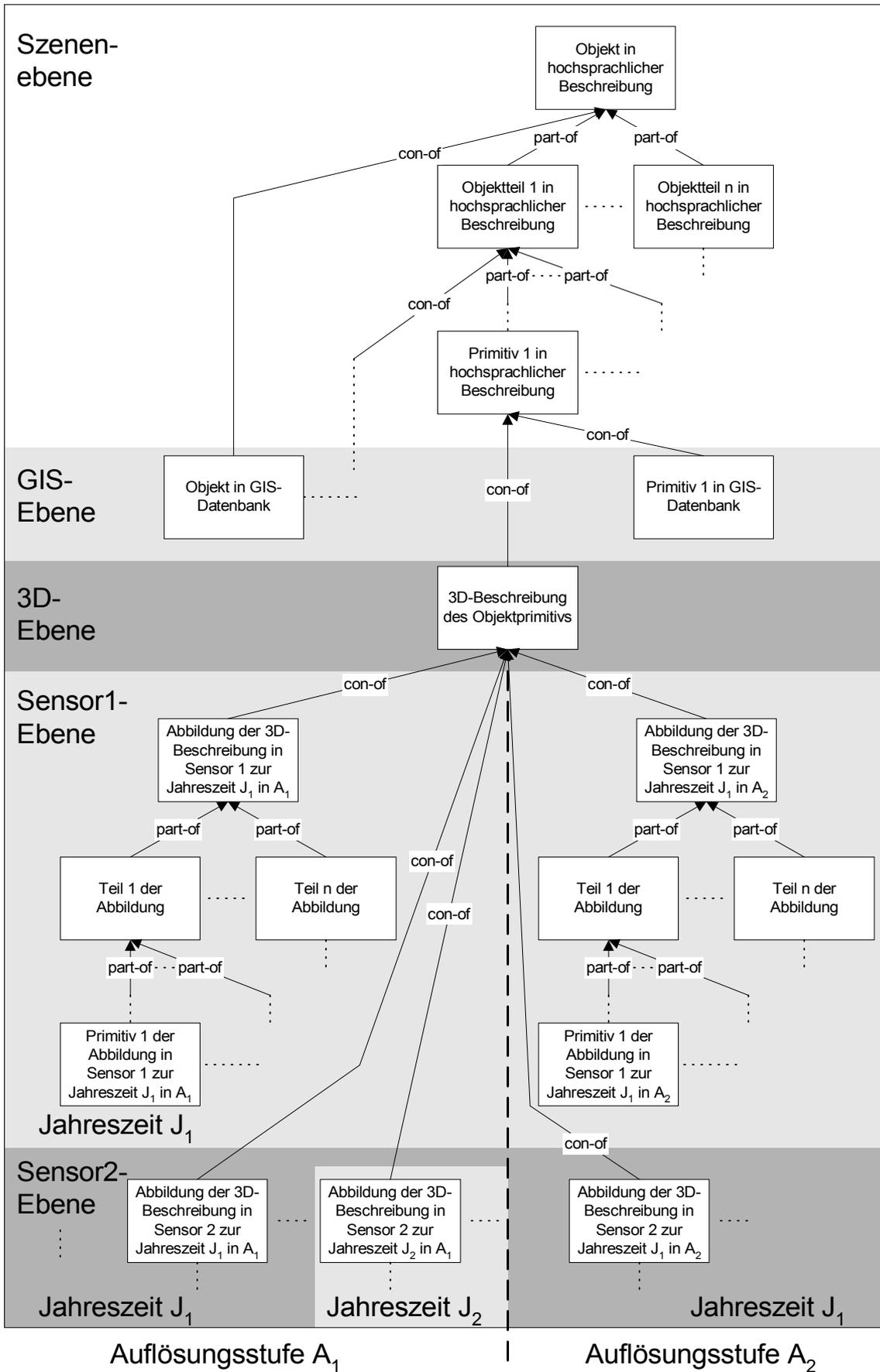


Abbildung 8: Konzept einer Objektbeschreibung im Semantischen Netz

Als Primitiv einer Ebene wird hier jeweils die feinste Einheit der Aufteilung und/oder Konkretisierung bezeichnet. Die Primitive in der jeweiligen Sensorebene sind an Bildverarbeitungsoperatoren gekoppelt und sollten an sie angepasst sein. Beschreibt ein Primitiv beispielsweise einen Kreis mit bestimmten radiometrischen und geometrischen Eigenschaften, so muss auch ein Operator bereitstehen, der diese Hypothese verifizieren kann.

Beispielhaft ist in Abbildung 8 eine Unterscheidung in zwei temporale Ebenen, die Jahreszeiten J_1 und J_2 für Sensor 2, dargestellt. Hierfür sind möglicherweise unterschiedliche Modellbeschreibungen notwendig. Zudem werden für beide dargestellten Sensoren beispielhaft zwei Auflösungsstufen, die Auflösungsstufen A_1 und A_2 unterschieden, für die u.U. jeweils auch unterschiedliche Modellierungen durchgeführt werden müssen.

Eine weitere Konkretisierung des Objektes in hochsprachlicher Beschreibung ist die in die GIS-Ebene. Hier wird das Objekt durch seine Beschreibung in einer GIS-Datenbank dargestellt. Dies kann beispielsweise das ATKIS-Basis-DLM sein. Dabei kann das Gesamtobjekt und/oder eines seiner Objektteile in der GIS-Ebene repräsentiert werden, je nach dem Vorhandensein im GIS und der Fragestellung. Strategisch ist eine solche Beschreibung bei einer entsprechenden Fragestellung sinnvoll, da auf diese Weise entweder direkt von dem Datenbankobjekt eine initiale Interpretation abgeleitet werden kann, die dann in den Sensordaten verifiziert wird, oder ein in den Sensordaten gefundenes Objekt über den Vergleich mit den GIS-Daten bestätigt werden kann.

3.2.2.1 Primitive

Die Primitive der Sensorebenen (siehe Abschnitt 3.2.2), die sich in unterster Lage im Netz befinden und jeweils mit einem Verifikationsoperator verknüpft sind, sollen als Primitive des Semantischen Netzes – oder einfach nur als Primitive - bezeichnet werden. Das bedeutet, dass keine *Part-of*, *Con-of* und *Is-a* Relationen zu diesen Knoten hin führen. Wird somit im Verlauf einer Verifikation eine Hypothese zu einem Primitiv aufgestellt, erfolgt im darauffolgenden Schritt die Verifikation in den Rasterbilddaten. An dieser Stelle findet folglich der Übergang von der symbolischen Verarbeitung zur Bildverarbeitung (High-Level zu Low-Level) statt.

Primitive sollen jeweils wichtige Eigenschaften der Objekte, wie Radiometrie, Form, Textur oder strukturelle Merkmale, beschreiben. Die richtige Wahl der Primitive hat für die Bearbeitung der jeweiligen Aufgabenstellung eine entscheidende Bedeutung. Primitive können Landschaftsobjekte oder deren Teile und Eigenschaften beschreiben. Welche Objekte überhaupt in das Semantische Netz eingefügt werden, ist von der jeweiligen Problemstellung abhängig.

Die Fragestellung, wie stark eine Unterteilung der Objekte in Teilobjekte durchgeführt werden sollte und damit, wie stark der Detaillierungsgrad der Objekte, die als Primitiv beschrieben werden, sein sollte, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Vor dem Hintergrund, dass die Interpretation mit Semantischen Netzen die Erstellung eines Modells der jeweils zu interpretierenden Objekte voraussetzt und dieses Modell über seine Primitive jeweils in den Rasterbilddaten zu verifizieren ist, muss ein Primitiv möglichst für alle Objekte, die über ihn erkannt werden sollen, gelten. Daher sollte die Aufspaltung in Teilobjekte so weit durchgeführt werden, bis die Primitive möglichst sicher in den Rasterbildern erkennbar sind. Daraus folgt, dass für Objekte, bei denen eine größere Variation in der Erscheinungsform möglich ist, die Detaillierung bis auf die Teilobjekte durchgeführt werden sollte, die noch möglichst sicher erkennbar sind und in ihrer Erscheinungsform nicht oder nur sehr wenig variieren. Die Grenze für die Bildung von Teilobjekten ist auch durch die Auflösung der Rasterbilder vorgegeben. Primitive, die bezogen auf die Auflösung der Rasterbilder zu klein sind, lassen sich durch Bildverarbeitungsoperatoren schlecht oder nicht mehr erkennen.

Die Erscheinungsform der Landschaftsobjekte kann über die Jahreszeiten hinweg veränderlich sein. In einem solchen Fall existieren zwei Möglichkeiten, die Objekte zu erkennen. Zum einen ist es möglich, nur Daten aus Zeitpunkten der gleichen Jahreszeiten zu verwenden und dafür ein Modell zu erstellen. Zum anderen kann das aufgestellte Modell auf die Primitive oder auf die Eigenschaften der Primitive beschränkt werden, die diesen Veränderungen nicht unterworfen sind. Wenn sich beispielsweise im Verlauf der Jahreszeiten die radiometrischen Eigenschaften eines Objektes verändern, jedoch nicht die Form, und das Modell für die Erkennung der Objekte aus unterschiedlichen Jahreszeiten verwendet werden soll, ist es sinnvoll, dass die verwendeten Primitive auch nur die Formeigenschaften des gesuchten Objektes beschreiben, nicht die radiometrischen.

Es kann zudem unterschieden werden zwischen notwendigen Primitiven, die auf jeden Fall in den Rasterdaten gefunden werden müssen und Primitiven, die optional gefunden werden können. Im zweiten Fall wäre das Vorhandensein der Primitive nicht erforderlich für die Erkennung eines Objektes. Andererseits stützt das Vorhandensein die Hypothese, dass ein Objekt erkannt worden ist.

Da die Aussagen der Primitive in den Rasterdaten verifiziert werden, ist bei ihrer Wahl darauf zu achten, dass die beschriebenen Eigenschaften auch tatsächlich in den Bildern durch Bildverarbeitungsoperatoren verifiziert werden können. Daher sind bei der Konzeption der jeweiligen Modelle die Eigenschaften und Grenzen der Bildverarbeitungsoperatoren zu berücksichtigen.

3.2.2.2 Flächenförmige Objekte

Flächenförmige Objekte sind in der Literatur häufig definiert worden. Die Definition nach [2] lautet beispielsweise:

„Eine Fläche wird durch ein Objekt bzw. Objektteil des Objekttyps "flächenförmig" modelliert, wenn sich Punkte des Randes im Rahmen der Modellgenauigkeit signifikant voneinander unterscheiden. Flächenförmig zu modellierende Objekte werden mit den ... Umringslinien beschrieben.“

Ein flächenförmiges Objekt in einer bestimmten Konkretisierungsstufe im Semantischen Netz wird durch jeweils einen Knoten repräsentiert. Zur geometrischen Beschreibung von flächenförmigen Objekten werden mindestens die Lage und die Form benötigt. Beide können beispielsweise durch eine Folge von Koordinaten, die bei geokodierten Rasterbildern die Form und zugleich die Lage beschreiben, dargestellt werden.

3.2.2.3 Linienförmige Objekte

Die Definition von linienförmigen Objekten in [2] lautet:

„Eine Fläche wird durch ein Objekt bzw. Objektteil des Objekttyps "linienförmig" modelliert, wenn der Rand im Rahmen der Modellgenauigkeit im Wesentlichen durch zwei Parallelen ersetzt werden kann, und die Länge dieser Parallelen sehr viel größer als deren Abstand ist.“

Beispiele für linienförmige Objekte sind Straßen, Eisenbahnschienen und Flüsse. Zur Beschreibung von linienförmigen Objekten wird häufig die Mittelachse des Objektes als eine Vektorfolge von geographischen Koordinaten verwendet und als Attribut stückweise die Breite des Objektes.

Diese Objekte zeichnen sich unter anderem dadurch aus, dass sie sich in Sensordaten, die gegenüber der jeweiligen Objektbreite niedrig aufgelöst sind, bei ausreichendem Kontrast zur Umgebung, als Linien abbilden. Linienförmige Objekte in der Landschaft haben meist die Eigenschaft, dass sie nicht durchgehend gleich gut zu erkennen sind. Bei natürlichen Objekten, wie z.B. bei Flüssen, ist die Annahme von parallelen Kanten meist nur im lokalen Bereich zutreffend. Über größere Längen betrachtet sind häufig größere Schwankungen in der Breite zu erkennen. Bei künstlichen Objekten, wie z.B. bei Straßen, kann oftmals zumindest von einer Mindestbreite ausgegangen werden, doch auch bei ihnen kann es in der Erkennbarkeit Probleme geben, die z.B. durch Verdeckungen und Schattenwurf entstehen. Bäume können Straßen (oder auch Flüsse) derartig überdecken, dass kein durchgängiger Verlauf mehr beobachtet werden kann. Durch Schattenwurf und Materialänderung bei Straßen bzw. durch eine Verschmutzung beim Fluss können sich die radiometrischen Eigenschaften der Objekte derart ändern, dass eine Homogenität der Radiometrie gestört wird.

Dies alles führt dazu, dass linienförmige Objekte häufig in Sensordaten nur stückweise extrahierbar sind und daher zusammengesetzt werden müssen. Das kann im Semantischen Netz geschehen. Dafür muss die Repräsentation gegenüber der eines flächenförmigen Objektes erweitert werden.

Die Extraktion von linienförmigen Objekten kann in zwei Schritte unterteilt werden:

1. Linienextraktion auf Rasterbildebene
2. Gruppierung der erhaltenen Liniensegmente

Wird von einer Strategie der Initialsegmentierung ausgegangen (siehe Abschnitt 3.1), so erfolgt die Durchführung von Schritt 1 vorab. Eine Strategie zur Durchführung von Schritt 2 ist in Abbildung 9 dargestellt.

In diesem Beispiel sind 4 Liniensegmente extrahiert worden, die es zu gruppieren gilt. Häufig verwendete geometrische Kriterien dafür sind der Abstand zwischen den Linienenden und die Winkeldifferenz zwischen den Tangenten an den jeweiligen Linienenden.

Das Konzeptnetz für die Gruppierung enthält zwei Knoten: *Linienförmiges Objekt* und als Teil davon den Knoten *Liniensegment*. Dieser enthält eine Attributierte Relation *benachbart-zu* auf sich selbst. Hiermit wird das Konzept zur Gruppierung der Liniensegmente über diese Nachbarschafts Relation erstellt. Die Instanzierung beginnt mit der Erstellung der Hypothese *Linienförmiges Objekt-1*. Top-down wird daraufhin die Hypothese *Liniensegment-1* erstellt. Damit wird als Anfangssegment in diesem Beispiel Segment 1 gebunden. Die Hypothese wird bestätigt und *Liniensegment-1* wird komplett instanziiert. Über die Attributierte Relation wird auf gleicher Ebene die Hypothese *Liniensegment-2* aufgestellt. Die Bedingung, dass ein zweites Liniensegment als Teil des linienförmigen Objektes akzeptiert wird, ist: $d_{ij} < d_{\min}$ und $\alpha_{ij} < \alpha_{\min}$. Dabei ist d_{ij} der Abstand zwischen den Linienenden der Segmente i und j und α_{ij} die Winkeldifferenz zwischen den Tangenten an den jeweiligen Linienenden der Segmente i und j.

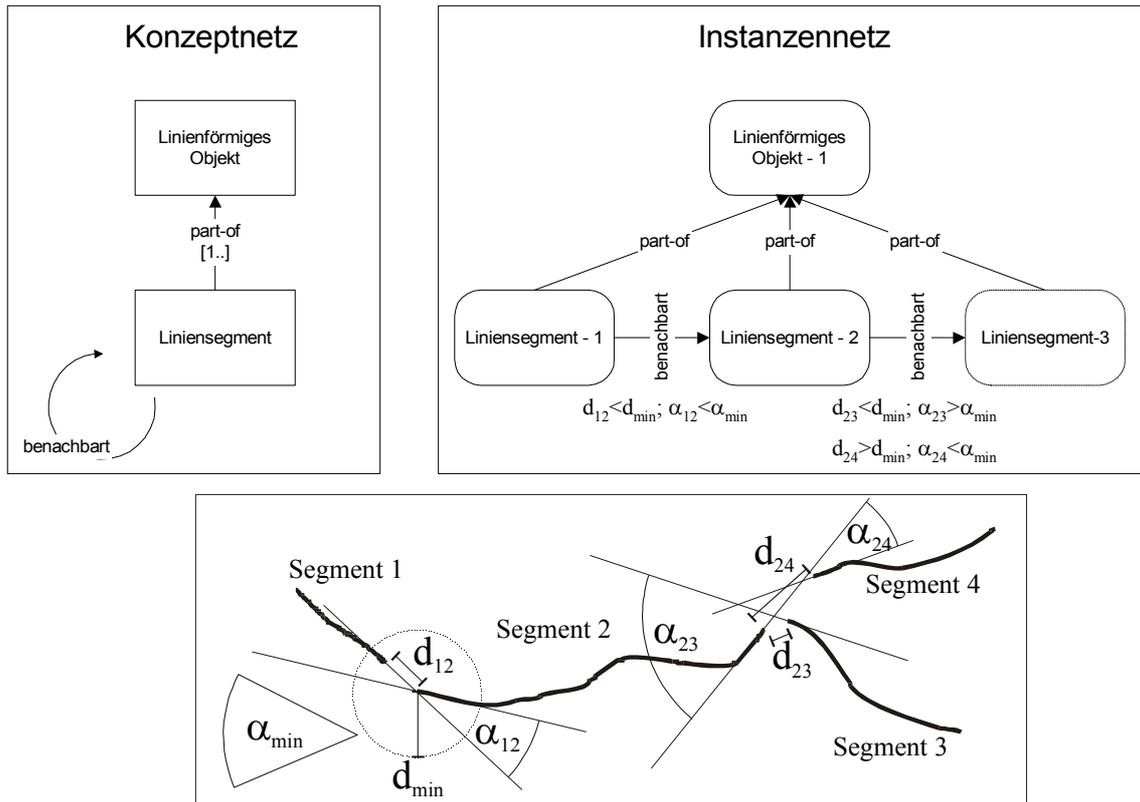


Abbildung 9: Gruppierung von linienförmigen Teilobjekten im Semantischen Netz

Wenn die vorgegebenen Grenzen d_{min} und α_{min} unterschritten werden, erfolgt die komplette Instanzierung. Dies ist im dargestellten Beispiel für *Liniensegment-2* erfüllt. Beim Aufstellen der Hypothese für *Liniensegment-3* jedoch findet sich kein geeigneter Kandidat, um eine Gruppierung durchzuführen, da entweder α oder d zu groß sind. Daher scheitert die Überprüfung dieser Hypothese und der Knoten *Liniensegment-3* wird zur fehlenden Instanz.

Die Werte von d_{min} und α_{min} lassen sich vorab heuristisch bestimmen. Sie hängen zum einen von den zu erkennenden Objekten ab. Bei der Erkennung von bestimmten natürlichen Objekten, wie z.B. Flüssen, wird man in der Regel die Winkelgrenzwerte niedriger setzen können als bei der Erkennung von bestimmten künstlichen Objekten, wie z.B. Straßen. Aber auch bei Straßen muss unterschieden werden zwischen Straßen im Stadtgebiet, Landstraßen und Autobahnen. Bei Autobahnen kann aufgrund der hohen möglichen Fahrzeuggeschwindigkeiten von einer geringeren möglichen Krümmung und damit einer kleineren sinnvollen Schranke für α_{min} ausgegangen werden als bei Landstraßen oder Straßen im Stadtgebiet.

3.2.2.4 Punktförmige Objekte

Für punktförmige Objekte lautet nach [2] die Definition:

„Eine Fläche wird durch ein Objekt bzw. Objektteil des Objekttyps "punktförmig" modelliert, wenn sich kein Punkt des Randes der Fläche signifikant, gemessen an der Modellgenauigkeit, von einem anderen unterscheidet. Punktförmig zu modellierende Objekte sind durch einen die Fläche repräsentierenden Punkt, ggf. unter Angabe des Durchmessers geometrisch bestimmt.“

Überträgt man diese Definitionen auf Rasterbilder, so folgt daraus, dass punktförmige Objekte aus einem Pixel bestehen. Da jedoch zur Erkennung eines Objektes mehr als ein Pixel benötigt wird, ist im Allgemeinen die Erkennung von punktförmigen Objekten durch Bildverarbeitungsoperatoren nicht möglich. Da alle Objekte in der Realität eine flächenförmige Ausprägung haben, stellen sie sich nur in Rasterdaten niedriger Auflösung (niedrig im Vergleich zur jeweiligen Objektgröße) als punktförmig dar. Zur Erkennung derartiger Objekte ist es notwendig, auf Rasterdaten höherer Auflösung zurückzugreifen und somit punktförmige Objekte als flächenförmige zu erkennen. Daraus folgt, dass sich alle betrachteten Primitive als flächenförmige oder linienförmige Objekte beschreiben lassen.

3.2.2.5 Objekte mit vorgegebener Geometrie

Bei der Interpretation von Objekten einer Szene muss Vorwissen über die gesuchten Objektarten vorhanden sein. Über die Objektarten, die in diesem Abschnitt betrachtet werden, liegt als Vorwissen die Geometrie vor (z.B. Kreise, Rechtecke). Dagegen müssen Informationen über die Radiometrie nicht unbedingt vorliegen. Darüber hinaus werden nur Objektarten betrachtet, die flächenförmig sind. Linienförmige Objekte, die die genannten Eigenschaften aufweisen, wurden in Abschnitt 3.2.2.3 beschrieben.

Objekte, die eine bestimmte vorher bekannte Geometrie aufweisen, sind in der Regel künstlich erzeugt. Natürliche Objekte, wie z.B. Seen oder Wälder, weisen üblicherweise keine vorher bekannte Geometrie oder bestenfalls nur unscharf zu beschreibende geometrische Eigenschaften auf. Ausnahmen bilden natürliche Objekte, die durch Eingriff des Menschen verändert oder angelegt wurden, z.B. Schwimmbäder, Hallen oder Autos, die oftmals rechteckige Strukturen aufweisen. Türme und industriell genutzte Becken (z.B. Klärbecken) weisen meist eine Kreisform auf. Auch größere Landschaftsobjekte können vorher bekannte Formen aufweisen: Fußballstadien weisen meist eine ovale Form auf, Autobahnkreuze meist eine Kleeblattstruktur.

Die Vorgabe, sich auf die Geometrie des zu erkennenden Objektes festzulegen ohne genaue Kenntnis der Radiometrie, führt zu der Strategie, das Objekt durch seine Begrenzung zur Umgebung zu erkennen. Damit wird vorausgesetzt, dass aus den zu untersuchenden Bildern der Übergang des jeweiligen Objektes zur Umgebung sichtbar ist. Dies bedeutet, dass sich beim Übergang die radiometrischen Eigenschaften oder die Textur ändern müssen.

Die Strategie der Interpretation und der Aufbau des Semantischen Netzes hängt im Wesentlichen davon ab, welches Verfahren auf der Low-Level-Ebene eingesetzt wird. Es können folgende drei Verfahren unterschieden werden:

1. Kanten bzw. Linienextraktion im Rasterbild mit anschließender Gruppierung der Linien im Semantischen Netz
2. Verwendung eines Operators, der darauf spezialisiert ist, Objekte mit bestimmten geometrischen Eigenschaften aus Rasterbildern zu extrahieren
3. Flächenhafte Segmentierung des Rasterbildes mit anschließender Zuordnung der Segmente aufgrund der Geometrie

In Abhängigkeit vom verwendeten Verfahren wird die Erkennung der Objekte entweder vollständig außerhalb des Semantischen Netzes durch den jeweils aufgerufenen Operator durchgeführt (Punkt 2), oder es werden Teile, die im Semantischen Netz zum Gesamtobjekt zusammengesetzt werden müssen, über die Bildverarbeitungsoperatoren geliefert (Punkt 1). Für diesen Fall muss das jeweilige Objekt im Semantischen Netz noch weiter verfeinert werden.

In Abbildung 10 ist als Beispiel ein Konzeptnetz zur Extraktion eines Fußballstadions aus Senkrechtaufnahmen dargestellt mit dem Hintergrund, das Objekt auf Teilobjekte derart zu reduzieren, dass die Primitive aufgrund ihrer Geometrie extrahiert werden können. Dieses Beispiel soll nur das Prinzip der Objektextraktion mit vorgegebener Geometrie verdeutlichen und nicht den Anschein erwecken, dass alle Fußballstadien allgemein mit diesem einfachen Modell extrahiert werden können. Nach dem Konzept besteht das Fußballstadion aus einer Zuschauertribüne und dem Spielfeld. Die Konkretisierung des Spielfeldes ist eine rechteckige Rasenfläche mit bekannten Maßen für die Länge und Breite. Die Konkretisierung in die Sensorebene führt auf die Beschreibung als Rechteck. Dieses Rechteck hat bestimmte Maße, die auf die Sensorebene umgerechnet sind (Annahme hier: Sensor mit 1m/Pixel). An dieser Stelle könnte nun ein spezieller Bildverarbeitungsoperator aufgerufen werden (soweit vorhanden), der nach Rechtecken mit den vorgegebenen Maßen sucht. Im dargestellten Beispiel ist die Beschreibung jedoch weiter verfeinert worden, was dazu führt, dass ein größerer Anteil der Problemstellung durch das Semantische Netz gelöst wird.

Die Verfeinerung des Rechtecks führt auf vier Linien, die bestimmte Voraussetzungen bezüglich gegenseitiger Nachbarschaft, Parallelität und Rechtwinkligkeit erfüllen müssen. Damit befinden sich auf unterster Ebene Linien, die nach der Definition in Abschnitt 3.2.2.1 zu den Primitiven des Konzeptnetzes gehören. Diese stellen Anfragen an einen Operator, der nach Linienprimitiven mit den gegebenen Anforderungen im Rasterbild sucht. Dies kann mit den zwei Strategien, die in Abschnitt 3.1 unterschieden worden sind, durchgeführt werden:

Die erste Strategie ist die Initialsegmentierung. Hierbei wird am Anfang der gesamten Interpretation eine Linienextraktion durchgeführt. Diese kann z.B. aus einer Kantendetektion gefolgt von einem Aufreißen der Linien an gekrümmten Stellen und einer anschließenden Gruppierung kurzer Linienelemente zu langen Linien an Stellen mit kleinen Lücken bestehen. Aus dieser Operation entsteht eine Gruppe von Linienprimitiven. In der gleichen Gruppe sollten auch die jeweiligen Eigenschaften der Linienprimitive gespeichert sein, um Abfragen zu erleichtern. Die so erstellte Gruppe steht damit allen Operatoren im Semantischen Netz, die Linienprimitive selektieren sollen, zur Verfügung.

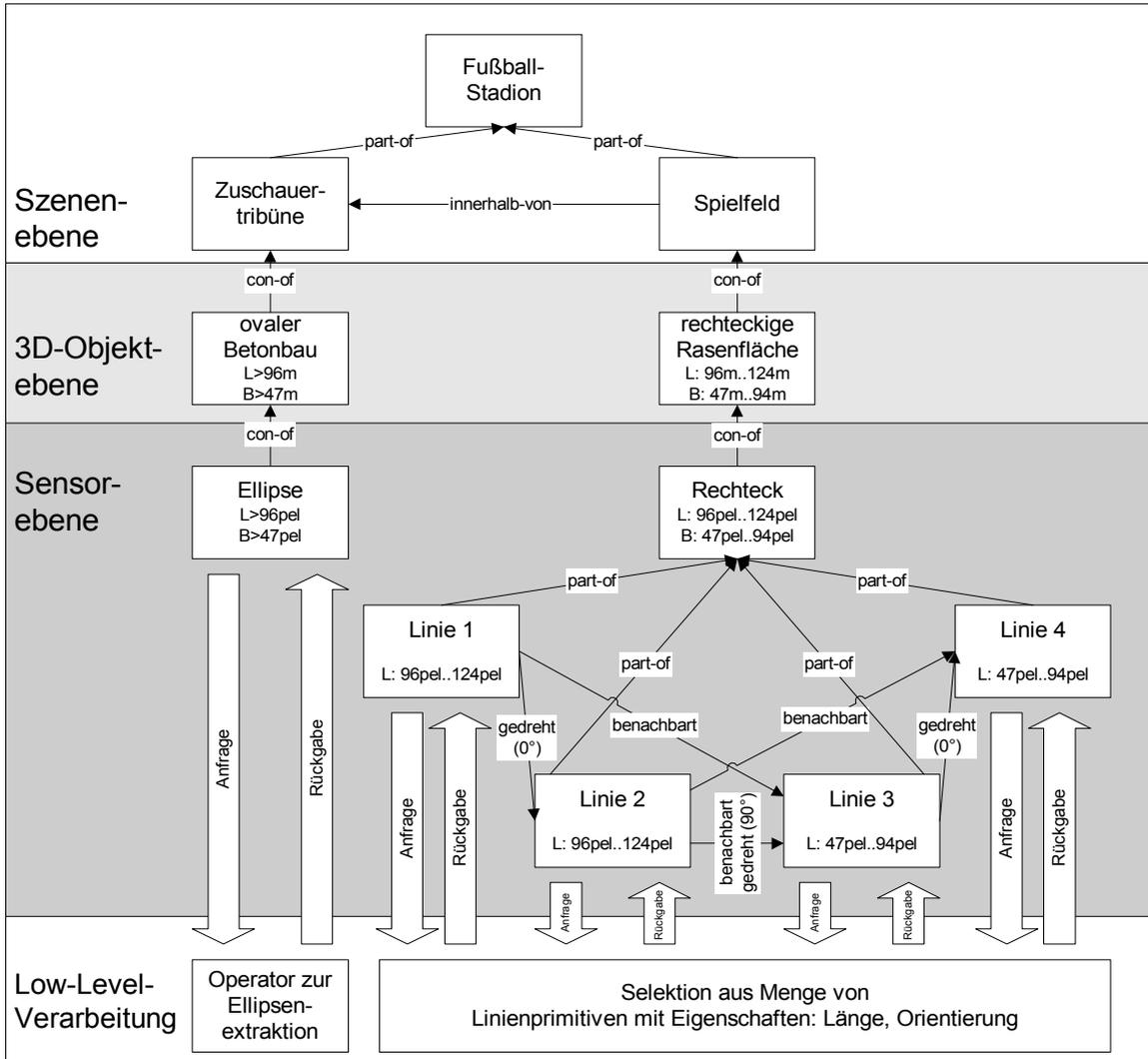


Abbildung 10: Beispielnetz zur Extraktion von Objekten mit vorgegebener Geometrie

In der zweiten Strategie, der dynamischen Segmentierung, wird jeweils im Verlauf der Interpretation die Extraktion der Linienprimitive durchgeführt. Dies hat den Nachteil, dass, wenn im Semantischen Netz die gleichen Linienprimitive wieder benötigt werden, diese erneut extrahiert werden müssen. Der Vorteil jedoch liegt darin, dass für jede Extraktion von Linienprimitiven sich im Verlauf der Interpretation ergebende angepasste Parameter für die jeweiligen Operatoren angegeben werden können.

Die Konkretisierung der Zuschauertribüne in Abbildung 10 ist ein ovaler Betonbau mit bestimmten Mindestmaßen, was sich in der Sensorebene als eine Ellipse darstellt. Zwischen Zuschauertribüne und Spielfeld existiert die räumliche Relation *innerhalb-von*. Dadurch wird festgelegt, dass die geometrischen Objekte auf unterster Ebene, die sich aus der Konkretisierung dieser beiden Teilobjekte ergeben, topologisch in einer bestimmten Art zueinander angeordnet sein müssen, damit die Hypothese der Existenz eines Fußballstadions erfüllt ist.

Im Gegensatz zum Spielfeld, das weiter in seine Bestandteile unterteilt wird, stellt die Ellipse als geometrische Figur auch die unterste Ebene dieses Stranges im Semantischen Netz dar und ist somit ein Primitiv. Abgesehen davon, dass die Unterteilung einer Ellipse in Teilobjekte, ähnlich wie beim Rechteck, wenig sinnvoll wäre, wird jedoch hierbei beispielhaft das komplette Objekt durch einen speziellen Primitivenextraktionsoperator gesucht und damit die Extraktionsaufgabe vollständig auf die Low-Level-Ebene übertragen.

Ob primär die jeweilige Extraktionsaufgabe auf der High-Level-Ebene oder auf der Low-Level-Ebene durchgeführt werden sollte, hängt insbesondere davon ab, welche Bildverarbeitungsoperatoren, die die jeweiligen Anforderung erfüllen, zur Verfügung stehen oder erstellt werden können. Die Lösung der Aufgaben im Semantischen Netz bietet meist eine große Flexibilität, so dass beim Fehlen entsprechender Bildverarbeitungsoperatoren für die Extraktion der jeweils gesamten Figur in vielen Fällen diese so lange in Teilfiguren unterteilt werden kann, bis entsprechende Operatoren zur Verfügung stehen oder erstellt werden können.

Unter der Annahme, dass die jeweiligen Low-Level-Operatoren für eine bestimmte Aufgabenstellung in Bezug auf die Leistungsfähigkeit optimiert sind, ist es insbesondere bei Betrachtung der Performance vorzuziehen, möglichst viel von der Extraktionsaufgabe auf die Bildverarbeitungsoperatoren zu übertragen. Wenn beispielsweise die Extraktion des Spielfeldes aus Abbildung 10 betrachtet wird, so müssen für die unterschiedlichen Kombinationen von Linien konkurrierende Hypothesen überprüft werden. Bei einer hohen Anzahl von Möglichkeiten spaltet sich der Suchbaum bereits für diese einfache Aufgabe ziemlich stark auf. Die Überprüfung der entstehenden konkurrierenden Hypothesen erfordert meist mehr Rechenaufwand als die Lösung der Aufgabe auf Low-Level-Ebene.

Die unter Punkt 2 genannten Bildverarbeitungsoperatoren, die bestimmte vorher definierte geometrische Figuren aus Rasterbildern extrahieren, können kantenbasiert und/oder flächenbasiert arbeiten. Soll unter der Bedingung, dass die Radiometrie bzw. Textur des zu extrahierenden Objektes nicht vorliegt, sondern nur die Geometrie bekannt ist, eine Extraktion durchgeführt werden, führt dies zu der Bedingung, dass der Low-Level-Operator nur kantenbasiert arbeiten darf. Wird ein Operator verwendet, der flächenhaft arbeitet, müssen auch Radiometrie-/Textur-Eigenschaften des jeweiligen Objektes bekannt sein.

Unter Punkt 3 ist als weitere Möglichkeit für die Extraktion von Objekten mit bekannter Geometrie eine flächenhafte Segmentierung mit anschließender Zuordnung der Segmente aufgeführt. Die verwendete Segmentierung muss in der Lage sein, eine Trennung der gesuchten Objekte von der Umgebung durchzuführen. Dies impliziert jedoch, dass auch die Radiometrie/Textur in gewissem Maße bekannt sein muss, da dadurch die Segmentierungsmethoden ausgewählt werden müssen, die geeignet sind, die gewünschte Trennung durchzuführen.

3.2.2.6 *Objekte mit vorgegebener Radiometrie/Textur*

Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.2.2.5 beschriebenen Landschaftsobjekten, die sich primär aufgrund ihrer geometrischen Form erkennen lassen, gibt es weitere Objekte, deren Form nicht charakteristisch ist, die jedoch trotzdem erkannt werden können. Zu dieser Gruppe gehören Objekte mit einer charakteristischen Radiometrie und/oder Textur. Das Vorwissen, das bei der Erkennung derartiger Objekte genutzt wird, ist nicht eine charakteristische Form, sondern die Radiometrie bzw. die Textur.

Zu dieser Gruppe von Objekten zählen größtenteils natürliche Landschaftsobjekte, die sich flächenhaft ausgebreitet haben. Als Beispiel hierfür sind Wälder und stehende Gewässer zu nennen. Gewässer lassen sich üblicherweise relativ einfach an ihrer Farbe und ihrer Homogenität erkennen (von Ausnahmen wie beispielsweise Wasserverschmutzung, Sedimenttransport, Spiegelungen etc. abgesehen). Ähnlich lassen sich Waldgebiete beispielsweise in Farbluftbildern aufgrund ihrer Farbe und ihrer Textur erkennen. Bei nicht zu hoch aufgelösten Luftbildern sind diese Gebiete meist homogen texturiert.

Das Vorwissen, das über die Objekte vorhanden sein muss, die Radiometrie und/oder die Textur, muss vor der Interpretation direkt als Attribut in das Konzeptnetz eingefügt werden. In Abbildung 11 ist als Beispiel ein Konzeptnetz dargestellt, das als Vorwissen Wertebereiche für die Grauwerte und deren Varianz der Landschaftsobjekte Gewässer, Asphalt und Wald enthält, die aus niedrig aufgelösten schwarzweißen Luftbildern extrahiert werden sollen. Die Wertebereiche werden top-down propagiert und an die Low-Level-Operatoren, die Bildverarbeitungsoperatoren, weitergegeben, die mit ihnen initialisiert werden. Die Rückmeldung, ob ein entsprechendes Objekt in dem Luftbild gefunden wurde oder nicht, stellt die Rückgabe vom Bildverarbeitungs-Operator zum Semantischen Netz dar.

Das manuelle Einfügen von Werten für die Radiometrie oder für die Texturparameter in das Konzeptnetz hat jedoch Nachteile. Die Aufnahme von Fernerkundungsdaten führt meist zu Bildern, die je nach der Aufnahmesituation und der Aufnahmeprozessierung bis hin zum digitalen Bild zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Die Aufnahme von Luftbildern, die zur Zeit noch fast ausschließlich analog erfolgt, führt schon in Abhängigkeit vom verwendeten Film zu unterschiedlichen Ergebnissen. Im weiteren Prozessierungsverlauf müssen die Luftbilder schließlich gescannt werden. In Abhängigkeit vom verwendeten Scanner und den jeweiligen Einstellungen am Gerät entstehen in der Regel auch unterschiedliche Ergebnisse.

Zudem können innerhalb der Bilder Helligkeitsunterschiede auftreten. So führen die Linsensysteme der Aufnahmesensoren zu einem Lichtabfall zu den Bildrändern hin (Vignettierung). Werden diese nicht korrigiert, führt dies zu einer uneinheitlichen radiometrischen Darstellung von Gebieten, die in der Realität gleiche radiometrische Eigenschaften haben. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Veränderung der Helligkeitsbedingungen während der Aufnahme. Wird beispielsweise eine größere Luftbildbefliegung durchgeführt, die über Stunden oder Tage geht, können sich im Verlauf die Beleuchtungsbedingungen derart ändern, dass ein Vergleich der am Anfang und am Ende aufgenommenen Luftbilder zu einer deutlich sichtbaren Differenz führen kann.

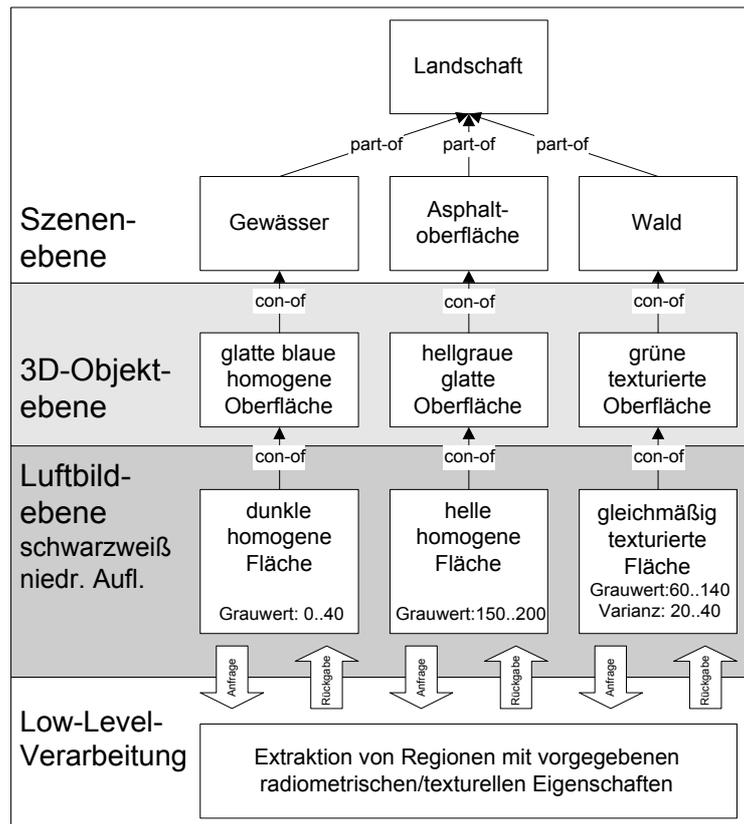


Abbildung 11: Konzeptnetz zur Interpretation mit vorgegebener Radiometrie/Textur

Diese und weitere Faktoren, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, führen schließlich dazu, dass die digitalen Bilddaten in der Helligkeit, im Kontrast und in den Farben derart variieren können, dass eine direkte Vorhersage der vorkommenden Grauwerte meist nicht oder sehr schwer möglich ist, ohne jeden einzelnen Schritt von der Bildaufnahme bis hin zur Erstellung des digitalen Bildes zu kennen und nachvollziehen zu können.

Es wäre von Vorteil, die Parameter zur Extraktion der Landschaftsobjekte nicht direkt als Vorwissen in das Konzeptnetz zu integrieren, sondern diese anzulernen. Dazu muss jedoch Vorwissen darüber vorhanden sein, wo sich die Gebiete in den Luftbildern befinden, die zum Anlernen der jeweiligen Parameter genutzt werden können. Diese Gebiete können einerseits manuell durch den Nutzer nach Sichtung der Daten vorgegeben werden. Im Zuge einer automatischen Interpretation jedoch scheint die Nutzung von GIS-Daten zweckmäßig zu sein. GIS-Daten beinhalten Lage- und Form-Informationen der unterstützten Landschaftsobjekte.

In diesem Fall wird damit das Vorwissen über Radiometrie bzw. Textur der Objekte ersetzt durch das Vorwissen über den Ort, an dem diese angelernt werden können. Als Nachteil der GIS-Daten gilt die Tatsache, dass sie nur zum Aufnahmezeitpunkt aktuell waren und damit für eine aktuelle Nutzung veraltet sein können. Daher sollten sie unter der Voraussetzung verwendet werden, dass sich die betrachteten Landschaftsobjekte über das zu untersuchende Gebiet hinweg nur in geringem Maße ändern. Diese Voraussetzung ist dann erfüllt, wenn entweder die Objekte grundsätzlich keinen großen Veränderungen unterworfen sind oder wenn die betrachteten Zeiträume für die Veränderung der jeweiligen Landschaftsobjekte kurz sind.

Dies trifft beispielsweise auf Gewässer zu. Flussverläufe ändern sich auf natürlicher Weise nur in relativ langen Zeiträumen. Künstliche Veränderungen von Gewässern können vorkommen. Dies geschieht jedoch selten und in der Regel nur in einem eingeschränkten Gebiet. Werden andererseits Waldgebiete betrachtet, so sind Veränderungen in einer Periode von beispielsweise 5 Jahren in einzelnen Gebieten zu beobachten. Die Mehrheit der entsprechenden Gebiete jedoch wird sich nicht oder nur geringfügig verändert haben.

Eine Anwendung für die hier beschriebene Strategie ist in Abschnitt 3.4 dargestellt.

3.2.2.7 *Objekte mit vorgegebenem Muster*

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Möglichkeiten, in welcher Form Vorwissen über die zu interpretierenden Objekte vorhanden sein kann, kommt nun als weitere Möglichkeit das Vorwissen über das Muster der Objekte hinzu. Bei bestimmten Strukturen ist es zweckmäßig, sie direkt in die Wissensbasis zu übernehmen. Dies ist jedoch nur sinnvoll für Strukturen mit einer geringen Variation. Eine Unterteilung in Teilstrukturen bis hin zu Primitiven wird bei diesen Objekten nicht durchgeführt.

Hubschrauberlandeplätze weisen im Gebiet der Bundesrepublik in der Regel immer die gleiche Form auf: Sie sind durch ein „H“ gekennzeichnet, das von einem Kreis umgeben ist. Für dieses Beispiel würde sich diese Form der Wissensbeschreibung gut eignen, da immer nach dem gleichen Muster gesucht wird.

Die Wissensbeschreibung wird in diesem Fall dadurch erreicht, dass ein oder mehrere Mustervorlagen als Grauwertbilder direkt als Vorwissen mit dem jeweiligen Konzeptnetz verknüpft sind. Der mit der Mustervorlage verknüpfte Knoten muss sich in der jeweiligen Sensorebene, der die Mustervorlage zuzuordnen ist, befinden. Im Verlauf der Interpretation, wenn eine aufgestellte Hypothese verifiziert werden muss, wird dann ein geeigneter Matchingoperator (siehe Abschnitt 3.3.4) aufgerufen, der als Parameter die Mustervorlagen erhält.

3.2.2.8 *Objekte mit charakteristischen Merkmalen*

Für viele Landschaftsobjekte ist es nicht möglich, eine bestimmte Textur und Radiometrie anzugeben. Der Grund kann darin liegen, dass sie bezüglich dieser Merkmale nicht homogen sind. Dies gilt vielfach für nicht künstlich erzeugte Landschaftsobjekte. Werden beispielsweise Biotope betrachtet, so kann häufig aufgrund der Arten-Vielfalt nicht von einer homogenen Textur in den Luftbildern ausgegangen werden.

Bei einer manuellen Interpretation werden derartige Regionen oftmals durch Merkmale, die sie enthalten müssen oder können, beschrieben. Die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Interpretationsschlüssel, die häufig zur Biotoptypenkartierung verwendet werden, beschreiben derartige Merkmale. So lautet die Beschreibung für einen Bereich im Hochmoor nach [9]:75:

„Im Luftbild erkennbar sind oft Spuren der Bewirtschaftung, wie z.B. Weidezäune, Fahrspuren, Entwässerungsgräben und dergleichen. ...“

Die Merkmale können bestimmte Strukturen (z.B. Fahrspuren, die im Bild wie parallele Linien aussehen) oder auch Farben sein. Wichtig in dem Zusammenhang ist, dass die Merkmale oftmals nur innerhalb der Regionen vorkommen müssen, die Regionen jedoch nicht unbedingt flächendeckend auszufüllen brauchen. Dies kann dazu führen, dass eine geometrische Abgrenzung zwischen unterschiedlichen Objektarten, die auf diese Art beschrieben sind, unscharf ist. Eine automatische Extraktion von derartigen Regionen ist deshalb schwierig, außer es sind eindeutige Grenzen, wie z.B. Zäune, vorhanden und sichtbar.

Während die Objekte in den vorangegangenen Abschnitten aufgrund der vorgenommenen Einschränkungen aus den Bilddaten extrahiert werden konnten und auf diese Weise eine klare geometrische Abgrenzung zur Umgebung möglich war, ist für den in diesem Abschnitt beschriebenen Fall die Abgrenzung nicht immer durchzuführen. Daher soll das Ziel des in diesem Abschnitt beschriebenen Falles nicht die Objektextraktion und damit das Auffinden der geometrischen Grenzen sein, sondern die Interpretation einer Region innerhalb vorgegebener Grenzen. Der Fall, dass eine Objektextraktion dennoch durchgeführt werden kann, weil eine scharfe Abgrenzung möglich ist, soll an dieser Stelle nicht ausgeschlossen werden. Er wird jedoch nicht vorausgesetzt.

Als Vorwissen für die Objektinterpretation muss somit die Lage und die Form des zu interpretierenden Segmentes bekannt sein. Die Objektbeschreibung beinhaltet Merkmale, nach deren Vorhandensein innerhalb des Segmentes im Verlauf der Interpretation gesucht werden muss. Die Merkmale werden dabei als Konzeptknoten im Semantischen Netz formuliert. Beispiele für derartige Konzeptnetze befinden sich in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 (z.B. Abbildung 26). Zur Verifikation der Objektmerkmale in den Bilddaten sind mit den Konzeptknoten auf unterster Ebene im Semantischen Netz Merkmalsanalyseoperatoren verknüpft (siehe Abschnitt 3.3.2). Sie verfolgen das Ziel, innerhalb vorgegebener Grenzen bestimmte Merkmale zu finden.

Die in dieser Arbeit durchgeführte Interpretation von Mooregebieten (siehe Kapitel 4) ist der hier beschriebenen Kategorie zuzuordnen. Die Grenzen der Segmente wurden vor der Interpretation festgelegt und für jeden Interpretationszeitpunkt aktualisiert. Der Interpretationsprozess selbst führte eine Bedeutungszuweisung für die vorgegebenen Segmente durch. Die Strategie ist in Abschnitt 4.3 beschrieben.

3.2.2.9 Objektstrukturen: Gruppierung der Objekte

3.2.2.9.1 Räumliche Relationen

Soll eine Interpretation eines Gebietes durchgeführt werden, indem einzelne Objekte allein aufgrund ihrer spektralen, textuellen und/oder geometrischen Eigenschaften eine Bedeutung erhalten, so kann dies für einige Objekte erfolgreich durchgeführt werden. Es ist jedoch möglich, dass Objekte aufgrund bestimmter Umstände nicht einwandfrei erkannt werden können. Dies wird beispielsweise durch ungünstige Beleuchtungsverhältnisse hervorgerufen. Durch Schattenwurf können z.B. die Konturen eines Objektes nicht eindeutig erkannt werden, womit die Interpretation unsicherer wird. Dies ist auch durch teilweise Überlagerungen von anderen Objekten möglich, wie beispielsweise bei einem Haus, dessen Konturen zum Teil durch einen Baum verdeckt sind.

In derartigen Fällen kann eine Einbeziehung von räumlichen Beziehungen in die Interpretation zu einer Verbesserung der Ergebnisse führen, da die Landschaftsobjekte nicht mehr isoliert betrachtet werden, sondern im Zusammenhang miteinander. Wenn beispielsweise für die Interpretation aufgrund der sichtbaren Merkmale eines Objektes mehrere konkurrierende Möglichkeiten existieren, können durch Betrachtung der räumlichen Nähe zu bestimmten anderen Objekten, die mit hoher Sicherheit interpretiert worden sind, einige der Interpretationsmöglichkeiten gestützt, andere ausgeschlossen werden. Dies bedeutet, dass durch die Erkennung von zusammengehörigen Objektstrukturen die Interpretation der Einzelobjekte unterstützt werden kann.

Andererseits gibt es Landschaftsobjekte, die allein über ihre Form und spektrale Eigenschaft nicht beschrieben werden können, da sie relativ starken Variationen unterliegen. Dies trifft beispielsweise auf eine Raffinerie zu. Es ist problematisch, eine Raffinerie als Ganzes mit einer festen Form und Radiometrie zu beschreiben, da ihr Aussehen starken Variationen unterworfen ist. Betrachtet man die Art und Weise, wie ein Auswerter eine Interpretation derartiger Objekte durchführt, so erkennt man, dass nach einzelnen charakteristischen Teilen, die über ihre Form und/oder Radiometrie gut erkannt werden können, und räumlichen Beziehungen der Teile zueinander gesucht wird. Beim Beispiel Raffinerie ergibt dies, dass unterschiedliche Objekte in unmittelbarer Nähe zueinander vorliegen müssen. So enthält eine Raffinerie u.a. mehrere große Produktions- und Verwaltungsgebäude, Lager- und Kugeltanks in unterschiedlichen Größen, die ein rundes Aussehen in Luftbildern haben, eventuell Bohrtürme und verschiedene andere turmförmige Anlagen, die über ihre Schattenbildung erkannt werden können. Diese sind durch Pipelines, die sich als dünne linienförmige Strukturen zeigen, miteinander verbunden. Straßen und eventuell Eisenbahnschienen führen in die Raffinerie. Raffinerien liegen meist an Häfen oder besitzen einen eigenen Hafen. Diese grobe Beschreibung zeigt bereits, dass derartige Objekte nur durch eine strukturelle Interpretation¹ zuzuordnen sind.

In [14] ist eine Klassifikation von topologischen Situationen durchgeführt und in ein Repräsentationsmodell integriert worden. Dabei wurde von zwei flächenförmigen Objekten ausgegangen, die zueinander unterschiedliche topologische Beziehungen aufweisen können. Insgesamt konnten 8 Fälle unterschieden werden. Übertragen auf die Interpretation von Bilddaten und die sich dabei ergebenden beobachtbaren Fälle können folgende räumliche Relationen zur sinnvollen Beschreibung von Objektstrukturen unterschieden werden:

- *in der Nähe*: Es wird eine indirekte räumliche Nachbarschaft zwischen zwei Objekten beschrieben. Sie dürfen sich nicht berühren. Wie groß der Abstand zwischen den Objekten maximal sein darf, ist als Parameter anzugeben. Zur Abstandsmessung können die zwei zueinander nächsten Konturpunkte verwendet werden.
- *benachbart*: Hiermit wird eine direkte räumliche Nachbarschaft zwischen zwei Objekten beschrieben. Sie liegt vor, wenn sich die beiden Objekte berühren. Ob dies im Pixelbereich bei einer Vierer- oder einer Achternachbarschaft der Fall ist, muss vorher festgelegt werden
- *innerhalb von/beinhaltet*: Befindet sich ein Objekt mit dem vollen Umfang seiner Kontur innerhalb der Kontur eines anderen Objektes, ist diese Beziehung erfüllt. Wenn beispielsweise Objekte und Objektteile über ihre Konturen identifiziert werden, kann diese Relation sinnvoll eingesetzt werden (siehe z.B. Abbildung 10). Ein Objekt, das sich innerhalb eines anderen Objektes befindet, kann Teil des anderen Objektes sein oder sich räumlich darüber oder darunter befinden (bei einer Senkeaufnahme).
- *über/unter*: Wird ein Objekt teilweise von einem anderen Objekt verdeckt, ist diese Beziehung erfüllt. Zur Verifikation dieser Relation ist zusätzlich zu den betrachteten Bildern Zusatzwissen notwendig (z.B. 3D-Information oder weiteres Vorwissen), da dieser Fall in 2D-Daten nicht direkt beobachtbar ist und daher von der Relation *benachbart* nicht unterschieden werden kann. So kann in einigen Fällen über Vorwissen auf diese

¹ Unter struktureller Interpretation wird die Interpretation einer Szene unter Verwendung von räumlichen Relationen verstanden

Relation geschlossen werden: Wenn beispielsweise eine Straße über die radiometrischen Eigenschaften und den Verbund zum Straßennetz identifiziert worden ist und im Luftbild ein hineinragender Baum detektiert wird, kann über das Vorwissen, dass eine Straße parallele Konturen hat, darauf geschlossen werden, dass sich der Baum über der Straße befindet. Ähnlich verhält es sich mit einer Brücke über einem Fluss, da das Vorwissen vorliegt, dass ein Fluss in der Regel nicht unterbrochen wird (Ausnahme Staudamm). Voraussetzung für diese Relation ist jedoch, dass die Objekte benachbart zueinander sind (bei einer Senkrechtaufnahme).

Zudem können auch Relationen verwendet werden, die die Ausrichtung der Objekte relativ zueinander festlegen. Dies kann beispielsweise über folgende Relation erreicht werden:

- *gedreht*: Mit dieser Relation wird die Ausrichtung zweier Objekte zueinander beschrieben. Hierbei müssen die Objekte in ihrer Form vergleichbar miteinander sein, damit für beide in gleicher Weise eine Bezugsachse festgelegt und zum Vergleich herangezogen werden kann. Dies kann beispielsweise die längere Achse des kleinsten umgebenden Rechtecks sein. Zusammen mit dieser Relation muss auch ein Winkel angegeben werden, der die Differenz zwischen den beiden Ausrichtungen darstellt und als Attribut zusammen mit der Relation gespeichert wird.

Bedingung für das Aufstellen von räumlichen Relationen ist, dass sie nicht über Ebenengrenzen gehen dürfen, da sonst ein Vergleich von Knoten durchgeführt wird, die nicht vergleichbar sind, da sie die jeweiligen Objekte auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen oder in unterschiedlichen Sensoren beschreiben. Zur Beschreibung der räumlichen Beziehungen werden die *attributierten Relationen* verwendet (siehe Abschnitt 2.2.6).

3.2.2.9.2 Gruppierung in Sensor- und Auflösungsebenen

Ein bestimmtes Objekt kann sich in unterschiedlichen Sensoren unterschiedlich abbilden, je nach den Eigenschaften der Sensoren. So können beispielsweise in einem Sensor die thermalen Eigenschaften eines Objektes dargestellt werden (z.B. Landsat TM Thermalkanal), während in einem anderen Sensor der Zustand der Vegetation innerhalb des Objektes durch eine Detektion der entsprechenden Spektralkanäle besser erfasst werden kann (z.B. CIR-Luftbilder).

Wird z.B. eine Autobahnstrecke betrachtet, so kann sie in niedrig aufgelösten Sensoren, wie beispielsweise Spot oder Landsat TM, als eine Linie erkannt werden. Betrachtet man sie in einem satellitengestützten SAR-Bild, so sticht sie gegenüber anderen Landschaftsobjekten als helle Linie hervor, da die metallenen Randbegrenzungen sich in dem Sensor relativ gut zeigen. Betrachtet man hingegen die Autobahnstrecke in Luftbildern, so kann eine Struktur mit Randbegrenzung und Fahrbahnmarkierungen erkannt werden.

Ähnlich verhält es sich mit Waldgebieten. In niedrig aufgelösten Sensordaten sind sie als homogene Flächen mit charakteristischem Spektrum erkennbar. Werden sie jedoch in Luftbildern betrachtet, kann eine Textur erkannt werden. Bei sehr hochaufgelösten Luftbildern sind Einzelbäume erkennbar. Zur Interpretation der Waldflächen allgemein sind die Texturen, die in den höheraufgelösten Bildern vorhanden sind, möglicherweise störend, weshalb für eine erste Interpretation eine Nutzung der niedrig aufgelösten Bilder vorteilhafter sein könnte, um dann in höheraufgelösten Bildern nach spezielleren Merkmalen zu suchen, wie beispielsweise in [34] durchgeführt.

Diese Beispiele zeigen, dass unterschiedliche Sensoren durch die Aufnahme unterschiedlicher Informationen in unterschiedlichen Auflösungen zur Erkennung unterschiedlicher Merkmale der jeweils betrachteten Landschaftsobjekte genutzt werden können. Die verschiedenen Sensoren können in ihrer Summe dazu beitragen oder genügend Informationen liefern, eine Interpretation von Landschaftsobjekten durchzuführen. Voraussetzung hierbei ist, dass die Aufnahmezeitpunkte der Szenen in den unterschiedlichen Sensoren im Idealfall gleich sind oder bezogen auf die möglichen Veränderungen der Objekte relativ nah beieinander liegen.

Daraus folgt, dass eine Beschreibung eines Landschaftsobjektes in unterschiedlichen Sensoren und unterschiedlichen Auflösungsstufen zu einer sinnvollen Interpretationsstrategie führen kann. Dabei ist zu überprüfen, welche zur Verfügung stehenden Sensoren neue für eine Interpretation wichtige Informationen liefern. Bei Sensoreigenschaften, die sich im Wesentlichen nur in der Auflösung unterscheiden, müssen nicht Daten unterschiedlicher Sensoren genutzt werden. Es kann auch eine Skalierung der hochaufgelösten Bilder in niedriger aufgelöste durchgeführt werden (z.B. [35]). Die unterschiedlichen Auflösungsstufen sind jedoch, wie auch die unterschiedlichen Sensoren, getrennt voneinander im Semantischen Netz zu beschreiben, da die Methoden zur Detektion der Merkmale sich in der Regel unterscheiden. Die Beschreibung im Semantischen Netz erfolgt über Konkretisierungen in unterschiedliche Sensor- und Auflösungsebenen (siehe Abschnitt 3.2.1).

Wenn zur Interpretation einer bestimmten Objektart die Beschreibung in unterschiedlichen Sensorebenen und eventuell auch in unterschiedlichen Auflösungsstufen durchgeführt wird, ist es sinnvoll, eine Strategie festzulegen, die die Bearbeitungsreihenfolge der verschiedenen Ebenen betrifft. Sie kann beispielsweise über verschachtelte *context dependent Relationen* (siehe Abschnitt 2.2.6) festgelegt werden. Dabei sollte zunächst mit der Interpretation in der Sensorebene und der Auflösungsstufe begonnen werden, in der die zu suchende Objektart sich am sichersten erkennen und gegenüber anderen abgrenzen lässt. Ist dies geschehen, kann mit weiteren Ebenen fortgefahren werden. Durch Redundanz der Objektinformationen in den vorhandenen Ebenen kann die Interpretation im Falle einer schlechteren Erkennbarkeit in einzelnen Sensoren weiter gefestigt werden. Eine weitere mögliche Strategie besteht darin, in einer niedrigen Auflösungsstufe zu beginnen, um in einem Suchprozess eventuell eine grobe Lage des Objektes zu finden und daraufhin in einer höheren Auflösungsstufe nach Details und einzelnen Teilen zu suchen. Dies ist beispielsweise auch bei Wäldern aus den oben genannten Gründen sinnvoll.

3.3 Interpretation auf der Rasterbildebene

3.3.1 Zielsetzung

Wie bereits beschrieben, wird durch die Semantischen Netze das Wissen über die zu interpretierenden Landschaftsobjekte und deren Zusammenhänge untereinander repräsentiert. Die Semantischen Netze werden allein zur High-Level-Interpretation genutzt, durch die im Verlauf der Interpretation zu verifizierende Hypothesen aufgestellt werden. Die jeweiligen Verifikationsergebnisse bestimmen den weiteren Verlauf der Interpretation. Während dieser Teil des Systems Informationen verknüpft, Verifikationen anfordert und die Ergebnisse in geeigneter Weise weiterverwendet, erfolgt der Zugriff auf die Rasterbilddaten selbst über bestimmte Bildverarbeitungsoperatoren.

Das Ziel der Bildverarbeitungsoperatoren ist die Verifikation von Hypothesen, die im Verlauf der Interpretation vom Semantischen Netz aufgestellt werden, in Rasterbildern. Sie werden daher im Verlauf der Instanzierung dann aufgerufen, wenn top-down in einer Sensorebene jeweils die unterste Ebene der Hypothesenbildung erreicht wurde. Dazu enthält jeder Konzeptknoten an der entsprechenden Stelle den Aufruf eines Bildverarbeitungsoperators. Über eine Schnittstelle können einschränkende und/oder steuernde Parameter für die Operatoren übergeben werden. Nachdem die Verifikation durchgeführt worden ist, wird über eine inverse Schnittstelle das Ergebnis der Verifikation an den jeweiligen Knoten zurückgegeben. Das Ergebnis besteht in der Regel aus einem Zahlenwert, der Auskunft über den Erfolg der jeweiligen Operation gibt. Dieser ist auf den Wertebereich [0..1] normiert. Optional können auch weitere Parameter zurückgeliefert werden, die in der Interpretation Anwendung finden.

Folgende Parameter werden vom Semantischen Netz an die Operatoren übergeben:

- Lage des Operationsgebietes
- Form des Operationsgebietes
- Auflösung des zu bearbeitenden Bildes
- Eventuell die Operation spezifizierende Parameter

Die Rückgabeparameter von den Operatoren an die jeweiligen Knoten des Semantischen Netzes lauten:

- Parameter, der Auskunft über Erfolg und Misserfolg der jeweiligen Operation gibt
- Parameter, die Auskunft über im Verlauf der Operation gefundene Objekteigenschaften geben (z.B. Form, Textur etc.)

Da das Semantische Netz eine explizite Wissensrepräsentation aufweist und die Konzeptknoten daher hochsprachlich beschrieben sind, haben die Operatoren auch jeweils die hochsprachlichen Inhalte zu verifizieren. Dies bedeutet, dass auch bestimmte Beschreibungsformen, die auf den ersten Blick nicht eindeutig fassbar zu sein scheinen, wie z.B. der Ausdruck „unregelmäßige Struktur“, die aber durchaus zur Beschreibung von Gebietseigenschaften verwendet werden, analysiert und als Operatoren umgesetzt werden müssen.

Es werden mehrere Gruppen von Bildverarbeitungsoperatoren unterschieden:

- Merkmalsanalyseoperatoren
- Primitivenextraktionsoperatoren
- Matchingoperatoren

In den folgenden Abschnitten sollen die Bildverarbeitungsoperatoren näher beschrieben werden, wobei der Schwerpunkt auf die Merkmalsanalyseoperatoren gelegt wird.

3.3.2 Merkmalsanalyseoperatoren

Wie in Abschnitt 4.2 näher dargestellt, wird bei der manuellen Interpretation von Luftbildern häufig mit Interpretationsschlüsseln gearbeitet. Aus der Gruppe der Interpretationsschlüssel werden die Eliminationsschlüssel dazu verwendet, charakteristische Merkmale, nach denen im Luftbild zu suchen ist, zu beschreiben, um ein Landschaftsobjekt in einer bestimmten Weise zu interpretieren. Die hier beschriebenen Merkmalsanalyseoperatoren können als eine Möglichkeit angesehen werden, die Merkmale des Eliminationsschlüssels auf automatische Weise durch Bildverarbeitungsoperationen zu überprüfen. Der Einsatz dieser Operatoren ist beispielsweise in der Interpretation von Biotopen oder Vegetationsflächen sinnvoll, bei der innerhalb von größeren Flächen nach bestimmten Merkmalen gesucht wird. Die Merkmalsanalyseoperatoren arbeiten jeweils in einem vorgegebenen Flächensegment.

Zusätzlich zu den nachfolgend beschriebenen allgemein einsetzbaren Merkmalsanalyseoperatoren werden in Abschnitt 4.3.2.3 Operatoren dargestellt, die primär im Kontext der beschriebenen Anwendung einsetzbar sind.

3.3.2.1 Vorverarbeitung

Alle Merkmalsanalyseoperatoren erhalten als Parameter u.a. den Ort, die Form und die Auflösung des zu bearbeitenden Segmentes. Daher können einige Vorverarbeitungsschritte für alle Operatoren zusammengefasst werden, da sie für alle gleich sind. Einige Operatoren arbeiten nur mit Texturinformationen (siehe Abschnitt 3.3.2.2). Für sie werden die Daten zunächst in Grauwertbilder umgerechnet, da keine Farbinformationen verwendet werden. Daraufhin erfolgt eine Verkleinerung des Segmentes um einen bestimmten Bereich. Der Grund dieser Operation ist die Beseitigung von Randerscheinungen (z.B. Mischpixelproblematik), die die Detektion verfälschen könnten. Ziel ist es, das Segment so weit zu verkleinern, dass der charakteristische Kern übrig bleibt und von den Merkmalsanalyseoperatoren untersucht werden kann.

Der notwendige Verkleinerungsgrad der Fläche setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen: Neben dem aus möglichen Orientierungsungenauigkeiten resultierenden Lagefehler der Bilddaten ist auch der aus der Modell- Ungenauigkeit folgende Lagefehler zu berücksichtigen. Falls beispielsweise die Lage und die Form der Segmente aus einem Geographischen Informationssystem (GIS) stammt und die Objekte durch Objektbildungsregeln entstanden sind, die besagen, dass flächenförmige Objekte immer durch linienförmige begrenzt sein müssen, wie z.B. im ATKIS Basis-DLM, entsteht ein Modellfehler, der sich zusammensetzt aus der Größe der halben Breite des linienförmigen Objektes und des Lagefehlers des GIS. Daneben wird noch eine Komponente hinzuaddiert, um weitere Randerscheinungen, die bei einigen Segmenten vorkommen, zu beseitigen (z.B. Hecken zur Begrenzung von Segmenten, Wege am Rand von Feldern etc.) und so möglichst den charakteristischen Kern der Segmente zu erhalten. Die Verkleinerung der Segmente erfolgt durch eine Versetzung der Randlinien um eine bestimmte Anzahl von Pixel nach innen.

Der letzte Vorverarbeitungsschritt besteht darin, die Daten auf eine Referenzgröße herunterzuskalieren. Die Referenzgröße wird in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung sinnvoll festgelegt. Durch diesen Schritt werden Daten unterschiedlicher Auflösung vergleichbar gemacht. Eine Anpassung von freien Parametern der verwendeten Operatoren, die von der Auflösung der Bilder abhängt, braucht dann nicht mehr durchgeführt zu werden.

3.3.2.2 Verifikation von Texturen

Die Merkmalsanalyseoperatoren zur Verifikation von Texturen nutzen keine multispektralen Informationen (Farbinformationen), sondern beschränken sich auf die Auswertung von Grauwertbildern.

3.3.2.2.1 Parallele Linien

Die Verifikation, ob in einer Fläche parallele Linien vorliegen, ist insbesondere in der Interpretation von Vegetationsflächen relativ wichtig, da sie Aufschluss darüber geben kann, ob sie in Bearbeitung ist oder nicht. Insbesondere bei landwirtschaftlich genutzten Flächen geben Fahrspuren von Traktoren gute Hinweise für eine Interpretation. Dies trifft auch auf Hochmoorgebiete zu. Dort lassen sich über die Detektion von parallelen Linien Hinweise auf Gebiete sammeln, in denen Torfabbau betrieben wird.

Das Ziel dieses Operators ist die Detektion von geraden parallelen Linien (siehe Abbildung 12). Der Operator soll robust gegen das Vorhandensein anderer Strukturen sein. Dies bedeutet, dass er im zu verifizierenden Gebiet auch dann erfolgreich parallele Linien detektieren soll, wenn andere Strukturen im Bild vorkommen. Es wird somit nicht ein homogenes Gebiet mit parallelen Linien erwartet.

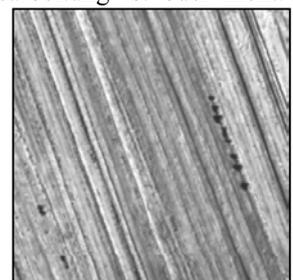


Abbildung 12: Beispiel parallele Linien

Folgende Bedingungen sollen durch das Maß verifiziert werden:

1. Im betrachteten Segment sollen parallele Linien vorhanden sein. Das bedeutet, dass der mittlere Richtungswinkel dieser Linien nahezu gleich ist. Je mehr parallele Linien gefunden werden, desto positiver soll der Operator reagieren. Es muss jedoch mindestens ein Linienpaar gefunden werden.
2. Die Linien, die als parallel gezählt werden, sollen eine bestimmte Länge überschreiten. Diese Mindestlänge hängt von der bearbeiteten Segmentgröße ab
3. Die Linien sollen gerade sein.
4. Die parallelen Linien sollen sich über das gesamte Segment verteilen.

Nach der Vorverarbeitung erfolgt als erster Analyseschritt die Überprüfung auf parallele Linien. Dazu wird zunächst eine Kantenextraktion durchgeführt, für die der Deriche-Kantenoperator eingesetzt wird. Der Deriche-Operator ist eine Weiterentwicklung des Canny-Kantenoperators [11] und weist u.a. die Eigenschaft auf, dass er eine optimale Kantendetektion im Sinne mehrerer Gütekriterien durchführt([40]:224):

- Empfindlichkeit gegenüber tatsächlich vorhandenen Kanten
- Störfestigkeit gegenüber dem Rauschen
- Genauigkeit der Kantenlage

Die ersten beiden Gütekriterien machen den Operator für die vorliegende Problemstellung besonders geeignet. Das Ergebnis der Kantenextraktion wird binarisiert und danach skelettiert. Das Bild wird in einem weiteren Schritt vektorisiert, wobei gleichzeitig eine Glättung der Vektoren durchgeführt wird. Die Vektormenge bildet die Grundlage der Untersuchung zur Erstellung des Maßes und wird analysiert.

Für alle Vektoren wird sowohl der mittlere Richtungswinkel als auch die Standardabweichung der Winkel berechnet. Aus allen Vektoren, deren Winkel eine Standardabweichung von weniger als 10° aufweisen, wird der am häufigsten vorkommende Winkel W_h innerhalb eines Bereiches von $\pm 5^\circ$ ermittelt. Die parallelen Linien sind definiert als die Linien, die länger als L sind, deren Winkel eine Standardabweichung von weniger als 10° aufweist und deren mittlerer Winkel mit einer Ungenauigkeit von $\pm 5^\circ$ W_h entspricht. L wird hierbei heuristisch auf 5% von der maximalen Segmentlänge gesetzt.

Es ergibt sich folgendes Maß:

$$\text{parallele Linien} = \min \left[\left(\frac{S}{9} \cdot \frac{N_{LW_h} - 1}{N_{LW_h}} \cdot \frac{L_{LW_h}}{A} \cdot K_{\text{parallele Linien}} \right), 1 \right]$$

S : Anzahl der Untersegmente, in denen mindestens eine parallele Linie vorhanden ist. Dazu wird das zu untersuchende Segment schachbrettartig in neun Untersegmente unterteilt.

N_{LW_h} : Anzahl der parallelen Linien nach obiger Definition

L_{LW_h} : Gesamtlänge der parallelen Linien nach obiger Definition

A : Flächeninhalt des betrachteten Segmentes

$K_{\text{parallele Linien}}$: Experimentell ermittelter Faktor

Der erste Term führt eine Gewichtung des Terms durch, die abhängig davon ist, in wie vielen Untersegmenten parallele Linien gefunden wurden. Damit wird die Bedingung unter Punkt 4 umgesetzt.

Der zweite Term überprüft, wie viele parallele Linien gefunden wurden, wobei für ein Maß > 0 mindestens zwei notwendig sind (Bedingung 1). Je mehr gefunden werden, desto höher fällt die Bewertung in diesem Teil aus.

Der dritte Term stellt die Gesamtlänge der gefundenen parallelen Linien in einem Verhältnis zur aktuell bearbeiteten Segmentfläche dar. Je mehr Linien bei gleich bleibender Fläche extrahiert werden, desto höher die Bewertung.

Der Faktor $K_{\text{parallele Linien}}$ ist experimentell dadurch ermittelt worden, dass Ausschnitte, die visuell eine hohe Anzahl paralleler Linien aufwiesen, den maximalen Wert 1 für das Maß ergeben sollten.

3.3.2.2.2 Unregelmäßige Struktur

Gebiete, die eine unregelmäßige Struktur aufweisen, sind in der Regel natürlichen Ursprungs. Werden beispielsweise Waldgebiete aus größerer Nähe betrachtet, so können Strukturen erkannt werden, die unregelmäßig erscheinen.

Das Ziel dieses Operators ist es, unregelmäßige Strukturen zu detektieren und ein entsprechendes Maß dafür zu errechnen. Regelmäßige Strukturen im Segment sollen das Ergebnis nicht beeinflussen.

Folgende Bedingungen sollen für diesen Operator gelten:

1. Die zu detektierenden Strukturen sollen stark gekrümmte Kanten sein.
2. Mit zunehmender Dichte der Strukturen soll der Operator bessere Ergebnisse liefern. Die Länge der betrachteten einzelnen Kanten ist unerheblich.
3. Die gekrümmten Kanten sollen sich über das gesamte Segment verteilen.
4. Der Operator soll unbeeinflusst von nichtkrummen Kanten arbeiten.

Als Erstes wird, wie auch beim vorangegangenen Operator beschrieben, eine Kantendetektion mit anschließender Vektorisierung durchgeführt. Danach erfolgt die Analyse der Vektoren, um daraus das Maß zu errechnen. Betrachtet werden somit die stark gekrümmten Vektoren. Als Bedingung für die gekrümmten Vektoren wird eine Standardabweichung der Winkel entlang der Vektoren von mehr als $W_k = 40^\circ$ verwendet.

Die Berechnung des Maßes geschieht folgendermaßen:

$$\text{unregelmäßige Struktur} = \min \left[\left(\frac{S}{9} \cdot \frac{L_{W_k}}{A} \cdot K_{\text{unregelmäßige Struktur}} \right), 1 \right]$$

S : Anzahl der Untersegmente, in denen mindestens eine gekrümmte Linie vorhanden ist. Dazu wird das zu untersuchende Segment schachbrettartig in neun Untersegmente unterteilt.

L_{W_k} : Gesamtlänge der stark gekrümmten Vektoren nach obiger Definition

A : Flächeninhalt des betrachteten Segmentes

$K_{\text{unregelmäßige Struktur}}$: Experimentell ermittelter Faktor

Der erste Teil der Berechnung soll auch hier eine Gewichtung des Maßes durchführen, je nachdem, welche Bereiche des Segmentes unregelmäßige Strukturen aufweisen. Der zweite Teil setzt die Gesamtlänge der selektierten Vektoren in Beziehung zur betrachteten Segmentgröße. Der Faktor $K_{\text{unregelmäßige Struktur}}$ ist experimentell dadurch ermittelt worden, dass Ausschnitte, die visuell eine unregelmäßige Struktur aufwiesen, den maximalen Wert 1 für das Maß ergeben sollten.

3.3.2.2.3 Struktur mit Vorzugsrichtung

Die Angabe, dass eine zu interpretierende Region eine Struktur mit oder ohne Vorzugsrichtung aufweist, kann eine wichtige Information für die Interpretation darstellen. Wenn beispielsweise ein zu interpretierender bewirtschafteter Acker vorliegt, weisen die Spuren der Traktoren eine Textur auf, die eine Vorzugsrichtung aufweist. Demgegenüber weist beispielsweise ein Waldgebiet eine unregelmäßige Struktur auf ohne Vorzugsrichtung. Obwohl in vielen Fällen Operatoren existieren, die speziellere Eigenschaften dieser Regionen untersuchen können, wie beispielsweise die direkte Detektion von parallelen Linien im Acker, kann dieser Operator verwendet werden, um zusätzliche Evidenz für eine Interpretation zu erhalten. Andererseits kann bei Bildern geringerer Auflösung, in denen die Suche nach speziellen Eigenschaften unter Umständen schwierig wird, die Verwendung dieses Operators zu nützlichen Ergebnissen führen.

Die Strategie zur Berechnung eines Maßes für diesen Operator geht von einer Fouriertransformation des Ausgangsbildes aus. Im Betragsbild der Fourier-Koeffizienten zeigen sich Strukturen mit Vorzugsrichtungen relativ gut dadurch, dass sie eine wenig rotationssymmetrische Struktur bilden.

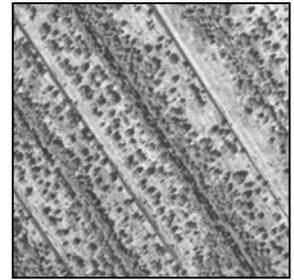


Abbildung 13: Beispiel unregelmäßige Struktur

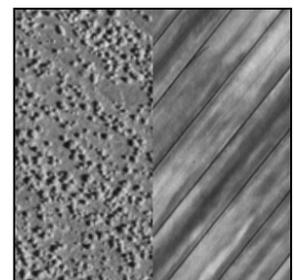


Abbildung 14: Struktur mit/ohne Vorzugsrichtung

Dies bildet den Ausgangspunkt für die Berechnung des Maßes: Nach einer Fouriertransformation und der Errechnung des Betrages aus dem komplexen Bild im Fourier-Raum folgt eine Binarisierung, um die Bildwerte vergleichbarer zu machen.

In Abbildung 15 ist dargestellt, wie das Maß berechnet wird. Die Variable d beschreibt eine Aufsummierung der Pixel entlang einer Geraden von 0 bis $\frac{2}{3} \cdot D$:

$$d(\varphi) = \frac{1}{\frac{2}{3} \cdot D} \cdot \sum_{r=0}^{\frac{2}{3} \cdot D} P(r, \varphi)$$

$P(r, \varphi)$: Pixelwert an den Polarkoordinaten r, φ

D : Halbe Fenstergröße des Fourier-Bildes

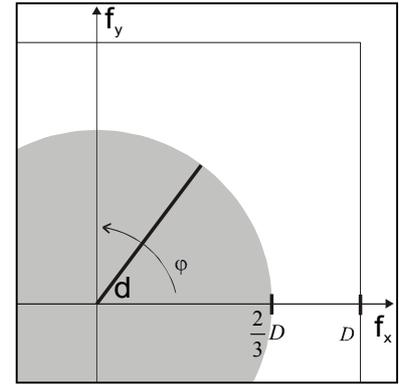


Abbildung 15: Analyse der Fouriertransformation

Kreisförmig wird d in Abhängigkeit von φ gedreht. Für jeden Winkel wird d berechnet. Dies entspricht einer Histogrammerstellung in Abhängigkeit vom Drehwinkel. Für die Histogrammwerte einer vollen Umdrehung wird die Standardabweichung σ berechnet.

Für nicht rotationssymmetrische Figuren ist in der Regel die auf diese Weise errechnete Standardabweichung höher als für rotationssymmetrische. Daher bildet sie den ersten Teil, aus dem das Maß berechnet wird. Der zweite Teil berechnet sich aus dem Verhältnis des maximalen Ausschlages von $d(\varphi)$ gegenüber dem Mittelwert zum Mittelwert selbst.

Das Maß für eine Struktur mit Vorzugsrichtung berechnet sich damit empirisch auf folgende Weise:

$$V_1 = \min \left[\frac{1}{128} \cdot \sigma [d(\varphi)] \cdot K1_{\text{Struktur mit Vorzugsrichtung}}, 1 \right]$$

$$V_2 = \min \left[\left(\frac{d_{\max}(\varphi) - E[d(\varphi)]}{E[d(\varphi)]} \right) \cdot K2_{\text{Struktur mit Vorzugsrichtung}}, 1 \right]$$

$$\text{Struktur mit Vorzugsrichtung} = \frac{1}{2} \cdot V_1 + \frac{1}{2} \cdot V_2$$

$K1,2_{\text{Struktur mit Vorzugsrichtung}}$: Experimentell ermittelte Faktoren

Der Grund, nur Strukturen, die sich im Bereich von $r < \frac{2}{3} D$ befinden, zu berücksichtigen, besteht darin, das hochfrequente Rauschen nicht mitzuerfassen. Dies entspricht einer Tiefpassfilterung.

Eine Realisierung der Fouriertransformation kommt vor dem Hintergrund heutiger Rechnerleistungen nur als FFT (Fast Fourier Transformation) in Betracht. Diese hat jedoch den Nachteil, dass quadratische Bilder vorliegen müssen, die eine Seitenlänge von 2^n mit $n \in \mathbb{N}$ aufweisen. Diese Einschränkung soll für die zu untersuchenden Regionen nicht vorgenommen werden. Daher werden die Regionen soweit ergänzt, bis sie die quadratische Form erreichen. Dazu wird das im Bild befindliche Muster in die neu hinzuzufügenden Regionen kopiert. Da die Textur selbst und nicht der Ort bestimmt, ob eine Vorzugsrichtung vorliegt oder nicht, ist dies zulässig. Damit an den Kopiergrenzen keine scharfen Kanten entstehen, die zur Verfälschung des Ergebnisses führen können, da sie selbst eine Vorzugsrichtung suggerieren, wird das Muster „weich einkopiert“. Dies bedeutet, dass das Muster an der Kante überlappend eingefügt wird, wobei sich die Gewichtung der Muster senkrecht zur Kante vom alten zum kopierten Muster kontinuierlich ändert. Bei näherungsweise gleich bleibender Textur innerhalb des Segmentes wird sich das Ergebnis durch den Kopiervorgang nicht entscheidend ändern. Wenn die Textur jedoch inhomogen ist und beispielsweise in einem Teil des Segmentes eine Vorzugsrichtung aufweist und in einem anderen Teil nicht, wird das Gesamtergebnis davon beeinflusst werden, von welchem Teil die einkopierte Textur stammt und wie viel einkopiert werden musste. Dieses stellt einen Schwachpunkt des Operators dar.

Daraufhin wird das quadratische Bild soweit skaliert, bis eine vorgegebene einheitliche Seitenlänge erreicht wird. Es ist wichtig, die Gebiete, die mit einer vorgenommenen Einstellung der experimentell ermittelten Faktoren ausgewertet werden sollen, so zu skalieren, dass sie gleiche Seitenlängen aufweisen, damit die Maße vergleichbar bleiben.

3.3.2.2.4 Homogenes Gebiet

Diese Eigenschaft ist für die Interpretation von vielen Gebieten wichtig. So können beispielsweise Wasser- oder Grünlandflächen als homogen beschrieben werden. Während das Wasser bei allen Auflösungsstufen der Bilder homogen bleibt (von Wellen- und Reflexionseffekten abgesehen), verändert sich die Homogenität von anderen Flächen, wie z.B. Grünland, mit der Auflösung. Bei einer relativ hohen Auflösung sind auch bei Grünland Texturen erkennbar, die die Region inhomogen machen. Daher ist bei der Verwendung dieses Operators auch immer der zugehörige Auflösungsbereich zu beachten.

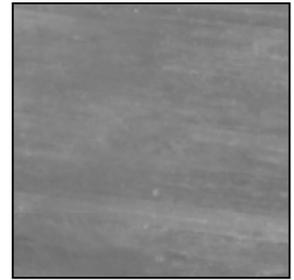


Abbildung 16: Beispiel homogene Fläche

Dieser Operator überprüft die zu untersuchende Region auf Homogenität. Als Maß dafür ergibt sich aus der Standardabweichung der Grauwerte innerhalb der Region.

$$\text{Homogenes Gebiet} = \max \left[1 - \left(\frac{1}{128} \cdot \sqrt{E[g(x,y) - E[g(x,y)]]^2} \cdot K_{\text{homogenes Gebiet}} \right), 0 \right]$$

$g(x,y)$: Grauwert an der Koordinate x, y

$K_{\text{homogenes Gebiet}}$: Experimentell ermittelter Faktor

3.3.2.2.5 Verhalten für unterschiedliche Texturen

In Abbildung 17 sind 12 Texturen dargestellt, für die die beschriebenen Merkmalsanalyseoperatoren angewendet wurden. Dabei wurden die Parameter K für jeden Operator konstant gehalten. Die Ergebnisse der Anwendung sind in Tabelle 1 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass der Operator zur Detektion *paralleler Linien* die Texturen 1, 2 und 12, die ausschließlich parallele Linien beinhalten, erwartungsgemäß mit dem maximalen Wert detektiert hat. Die Texturen 3 und 10, in denen schwächer ausgeprägte parallele Linien oder weniger vorkommen, wurde mit Werten zwischen 0,6 und 0,7 detektiert. Dagegen konnte in den Texturen 6 und 9 fast keine Detektion durchgeführt werden.

Der Operator zur Detektion von *unregelmäßiger Struktur* hat in den Texturen 4, 5, 6 und 8 maximal unregelmäßige Struktur detektiert. Der visuelle Eindruck der Texturen bestätigt diese Detektion. Dagegen wurde in den Gebieten, in denen der erste Operator eindeutig parallele Linien detektiert hatte, so gut wie keine unregelmäßige Struktur festgestellt.

Tabelle 1: Anwendung der Merkmalsanalyseoperatoren auf verschiedene Texturen

Textur Nr.	Parallele Linien	Unregelmäßige Struktur	Struktur mit Vorzugsrichtung	Homogenes Gebiet
1	1,00	0,01	1,00	0,41
2	1,00	0,00	0,72	0,62
3	0,64	0,58	0,36	0,45
4	0,43	1,00	0,31	0,29
5	0,34	1,00	0,26	0,48
6	0,02	1,00	0,20	0,62
7	0,33	0,37	0,21	0,43
8	0,32	1,00	0,26	0,15
9	0,05	0,52	0,21	0,47
10	0,69	0,16	0,90	0,44
11	0,56	0,69	0,54	0,23
12	1,00	0,04	0,76	0,42

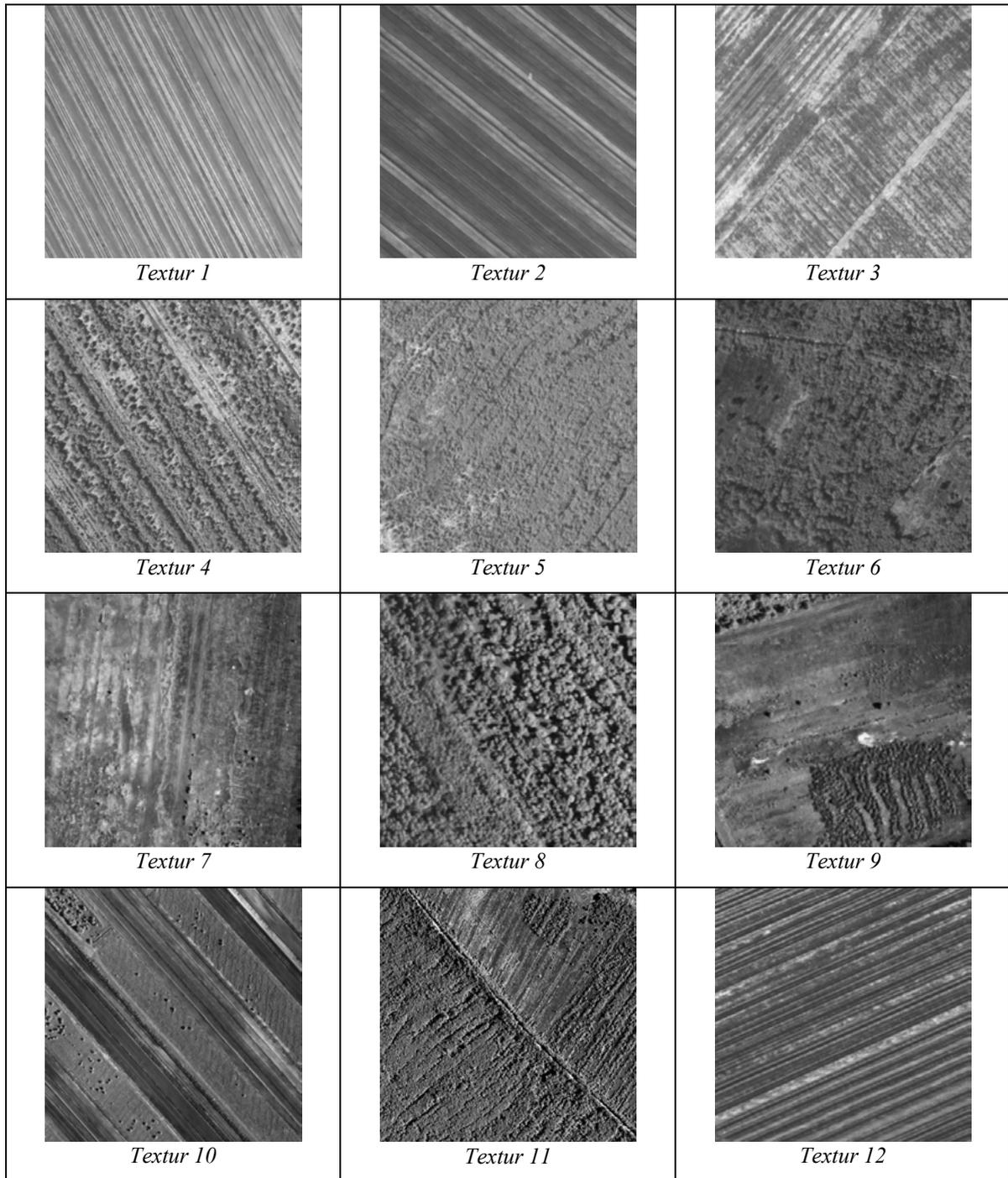


Abbildung 17: Texturen zur Verifikation der Merkmalsanalyseoperatoren

Der Operator zur Detektion der *Struktur mit Vorzugsrichtung* hat korrekterweise für die Texturen 1, 2, 10 und 12 eine eindeutige Vorzugsrichtung festgestellt. Dies wird durch das eindeutige Linien- bzw. Streifenmuster bestätigt. Interessant stellt sich die Textur 11 dar: Durch den Straßenverlauf erhält die ansonsten ungerichtete Textur eine, wenn auch geringe, Vorzugsrichtung.

Der Operator zur Detektion von *homogenen Gebieten* liefert die erwarteten Ergebnisse.

3.3.2.3 Verifikation von spektralen Eigenschaften

3.3.2.3.1 Farbe

Bei der expliziten Beschreibung von Gebietseigenschaften wird bei Verwendung von Farbbildern relativ häufig die vorrangig vorkommende Farbe des Gebietes verwendet. Sie stellt eine wichtige Eigenschaft dar, die zur Interpretation herangezogen werden kann. Dies zeigt sich auch an der Tatsache, dass bei der Frage nach dem Aussehen eines Gebietes an einen Auswerter häufig als Erstes eine Farbangabe gemacht und erst danach auf die übrigen Eigenschaften eingegangen wird, insbesondere in Vegetationsgebieten. Der hier beschriebene Operator soll eine Farbangabe überprüfen. Ausgehend von einer vorgegebenen Farbe soll er ein Maß zurückliefern, welcher Anteil der Fläche diese Farbe beinhaltet.

Die in einem vorgegebenen Gebiet zu suchenden Farbwerte sollten weitgehend unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen und Betrachtungswinkeln sein. Im RGB-Farbraum ist dies nur im geringen Maße gegeben. In [31] wird daher vorgeschlagen, im CIELAB-Farbraum zu arbeiten. Verschiedene Arbeiten (z.B. [65]) bestätigen dies.

Die dem CIELAB-System zugrunde liegende Formel stellt zudem einen guten Kompromiss zwischen der linearen Gleichabständigkeit der Farben mit vernünftig zumutbarem Rechenaufwand dar.

Ausgehend vom RGB-Farbraum wird die Berechnung der Normfarbwerte bei Zugrundelegung der Monitorgrundfarben folgendermaßen durchgeführt ([26]:53):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,478 & 0,299 & 0,175 \\ 0,263 & 0,655 & 0,081 \\ 0,020 & 0,160 & 0,908 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Die Berechnung der L^* , a^* und b^* -Werte wird daraufhin wie folgt vorgenommen:

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$a^* = 500 \cdot \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$b^* = 200 \cdot \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

L^* gibt die Helligkeit an, a^* und b^* die Farbwerte. Hierbei gibt a^* die Rot-Grün-Buntheit an und b^* die Gelb-Blau-Buntheit. X , Y und Z stellen die Farbe als CIE-Normfarbwerte dar. Die Normfarbwerte X_n , Y_n und Z_n des vollkommen mattweißen Körpers unter der beleuchtenden Lichtart legen den Unbuntpunkt fest.

Farbton h_{ab} und Buntheit C^* werden aus diesen Werten folgendermaßen berechnet:

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

h_{ab} gibt damit den Wert an, der bei der Farbverifikation überprüft werden muss.

Für alle zu überprüfenden Farben werden initial die Wertebereiche für h_{ab} definiert. Die Abgrenzung zu anderen Farben kann durch eine visuell durchgeführte manuelle Kalibrierung durch einen Auswerter geschehen. Zusätzlich zum Farbton h_{ab} kann auch die Helligkeit L^* verwendet werden, um die Farben zusätzlich nach hell und dunkel zu unterscheiden.

Als Eingang für diesen Operator wird die zu verifizierende Farbe und Region übergeben. Nach einer Farbtransformation werden alle innerhalb des Gebietes liegenden Pixel der Region mit der vorgegebenen Farbe extrahiert und ins Verhältnis zur Gesamtfläche der Region gesetzt. Daraus ergibt sich der Rückgabewert dieses Operators, der ein Maß für das Auftreten der angegebenen Farbe in der Region darstellt.

3.3.2.3.2 NDVI

Mit Hilfe des NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) lässt sich unter Verwendung der entsprechenden Kanäle ein Maß für das Vorhandensein und den Zustand von Vegetation, genauer von Biomasse, gewinnen. Wenn für eine bestimmte Interpretation das Vorhandensein von Vegetation vorausgesetzt wird, stellt der NDVI hierfür ein nützliches Werkzeug dar.

Der NDVI kombiniert zwei Effekte: Die hohe Reflektion an gesunden Pflanzenzellen im nahen Infrarot-Kanal (NIR) und die geringe Reflektion im roten Kanal durch die Chlorophyll-Absorption.

Entsprechend wird er auf folgende Weise berechnet:

$$NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot}$$

NIR: Grauwert des Kanals im Bereich des Nahen Infrarot.

Rot: Grauwert des Kanals im Bereich des Rot.

Der Wertebereich erstreckt sich von -1 bis 1 . Bei Verwendung von CIR-Luftbildern entspricht der NIR dem roten Kanal und Rot dem grünen Kanal.

Neben dem NDVI existieren zahlreiche weitere Indizes, die ein Maß für das Vorhandensein und die Gesundheit von Vegetation darstellen. Der NDVI ist jedoch ein guter Kompromiss aus Rechenaufwand und Ergebnis. Durch seine Normierung ist das Ergebnis gut interpretierbar, er ist gut mit der vorkommenden Vegetation korreliert [53], und ist auch für die Erkennung relativ spärlicher oder aufkommender Vegetation geeignet ([36]:54ff). Aus diesen Gründen wurde er hier gegenüber anderen Indizes bevorzugt.

Als Eingangsgrößen erhält der Operator die Anfragen nach hohem, mittlerem oder niedrigem NDVI-Anteil zusammen mit der zu verifizierenden Region. Die Berechnung der Rückgabewerte erfolgt aus dem Anteil der mit Biomasse bedeckten Fläche an der Gesamtfläche, in Abhängigkeit von der Abfrage empirisch skaliert:

$$hoher\ NDVI - Anteil = \min \left[\left(\frac{A_{NDVI+}}{A_{ges}} \cdot K_{hoher\ NDVI - Anteil} \right), 1 \right]$$

A_{NDVI+} : Anzahl Pixel mit $NDVI > 0$

A_{ges} : Anzahl Pixel der gesamten untersuchten Fläche

$K_{hoher\ NDVI - Anteil}$: Experimentell ermittelter Faktor

3.3.3 Primitivenextraktionsoperatoren

Die Primitivenextraktionsoperatoren extrahieren, wie der Name schon sagt, geometrische Primitive, die von entsprechenden Konzeptknoten aus dem Semantischen Netz angefordert werden. Dabei werden hier als Primitive einfache geometrische Formen, wie z.B. Linien, Quadrate oder Kreise verstanden.

Zur Extraktion von Linien existieren in der Literatur zahlreiche Methoden (z.B. [10] [29] [40]). Die einfachsten Standardmethoden extrahieren Kanten aufgrund von lokalen Grauwertdifferenzen. Sie werden da extrahiert, wo die Grauwertdifferenzen am höchsten sind. Weitere Verfahren verwenden komplexere Linienmodelle, die in den Bilddaten gesucht werden. Beispielsweise wird in [67] ein Modell für das Grauwertprofil der Linie verwendet, wobei unterschieden wird, ob das Grauwertprofil um die Linie symmetrisch ist oder nicht. Das verwendete Modell basiert auf einem rechteckigen Grauwertprofil eines Streifens mit einer vorgegebenen Linienbreite. Da die Bilder verrauscht sind, wurde das Profil mit einem Gaußfilter gefaltet. Das Verfahren liefert Linien mit einer Genauigkeit im Subpixel-Bereich.

Für die Operatoren zur Extraktion von geometrischen Formen können zwei Ansätze verfolgt werden. Der erste führt eine Segmentierung im gegebenen Suchbereich durch. Für die Primitive, die aus der Segmentierung heraus entstanden sind, werden unterschiedliche Formparameter berechnet. Hierfür kommen beispielsweise die Länglichkeit und die Kompaktheit in Frage ([69]:104). Aus der Kompaktheit lässt sich beispielsweise ein Rückschluss auf einen Kreis ziehen.

Die Parameter berechnen sich wie folgt, wobei größere Werte die jeweilige Aussage verstärken:

$$M_{\text{Länglichkeit}} = \frac{A_R}{B_R^2}$$

$$M_{\text{Kompaktheit}} = \frac{U_R^2}{A_R}$$

A_R : Flächeninhalt/Gesamtzahl der Pixel des untersuchten Objektes

U_R : Umfang/Anzahl Konturpixel des untersuchten Objektes

B_R : Breite/Anzahl Erosionsoperatoren, die nötig sind, um Objekt zu entfernen

Der zweite Ansatz ist die Verwendung von Matchingoperatoren unter der Verwendung von geeigneten Mustermatrizen, die die zu suchenden geometrischen Primitive beschreiben. Darauf wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

3.3.4 Matchingoperatoren

Die Matchingoperatoren sind an Konzeptknoten gekoppelt, die als Vorwissen über die zu extrahierenden Landschaftsobjekte Mustermatrizen (Templates) aufweisen (siehe 3.2.2.7). Sie erhalten aus dem Semantischen Netz die Matrizen, die die zu suchenden Strukturen beschreiben, zusammen mit dem jeweiligen Suchbereich. Der Operator liefert nach der Operation ggf. den Ort, an dem das Muster gefunden wurde, zusammen mit einer Sicherheit, mit der die Detektion stattfand.

Aus der Gruppe der Operatoren, die dem Bereich der Bildzuordnung zuzuordnen sind, ist hier die Anwendung derjenigen, die eine Bildzuordnung auf Basis von Grauwerten durchführen, sinnvoll. Das einfachste Verfahren aus dieser Gruppe ist das der digitalen Bildkorrelation. Dabei wird die Mustermatrix pixelweise über den Suchbereich des Bildes geschoben, und es wird für jede Position der Kreuzkorrelationskoeffizient berechnet. Der Wert des Kreuzkorrelationskoeffizienten gibt Aufschluss über das Maß der Übereinstimmung. Eine Erweiterung der digitalen Bildkorrelation stellt die Methode der kleinsten Quadrate dar. Sie kann invariant gegenüber geometrischen und radiometrischen Einflüssen aufgebaut werden. Es existiert eine umfangreiche Palette an Matching- und Bildzuordnungsverfahren [30]:289ff [33], auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

3.4 Waldextraktion aus SW-Luftbildern mit ATKIS-Vorwissen

Da die in Abschnitt 3.2.2.6 beschriebene Strategie für die Vegetationsextraktion aus Fernerkundungsdaten eine große Bedeutung hat, soll nachfolgend eine Anwendung hierzu vorgestellt werden (siehe auch [60]).

In Abbildung 18 ist das verwendete Konzeptnetz für die Aufgabenstellung: Waldgebiete unter Zuhilfenahme von Daten aus dem ATKIS-Basis-DLM zu extrahieren, dargestellt. Die Interpretation wird beim Konzeptknoten Wald gestartet. Es wird eine Hypothese *Wald* aufgestellt. Entlang der *part-of* Relation wird daraufhin top-down eine Hypothese *Wald-Lernregion* aufgestellt. Dieser Knoten wird nach und nach abwechselnd ATKIS-Objekte für das Untersuchungsgebiet aus der ATKIS-Datenbank anfordern und im Luftbild mit deren Hilfe Parameterwerte für die Radiometrie und für die Textur anlernen. Dies bedeutet, dass im nächsten Schritt top-down über die Relation *con-of* die Hypothese *ATKIS-Objekt Objektart 4107* (4107 entspricht der Objektart Wald) erstellt wird. Dabei werden als Attribut top-down die Koordinaten des Untersuchungsgebietes übergeben (Schritt 1). Nun, da die Interpretation an ihren lokal untersten Punkt, der GIS-Ebene, angekommen ist (top-down kann keine Hypothese mehr aufgestellt werden), wird aus dem Hypothesenknoten heraus über eine Schnittstelle zu den ATKIS-Daten eine Anfrage durchgeführt. Für die Anfrage werden die Koordinaten des Untersuchungsgebietes als Randbedingung übergeben. Aus der ATKIS-Datenbank erfolgt als Rückgabe der Ort und die Form eines ATKIS-Objektes der Objektart 4107. Ort und Form werden bottom-up an den Knoten *Wald-Lernregion* übergeben.

Im nächsten Schritt wird top-down über die Relation *cdcon-of* die Hypothese *gleichmäßig texturierte Lernregion* erstellt. Dieser Knoten ruft im nächsten Schritt einen Bildverarbeitungsoperator auf, der innerhalb der Grenzen des ATKIS-Objektes Textur- und Radiometrieparameter anlernt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der größte Teil der betrachteten Fläche bezüglich der betrachteten Parameter näherungsweise homogen ist. Daher wird zunächst der Teil der Fläche, der den größeren Anteil an der Lernregion ausmacht und bezüglich der Parameter homogen ist, extrahiert. Für diese Fläche werden daraufhin die Mittelwerte der Parameter errechnet.

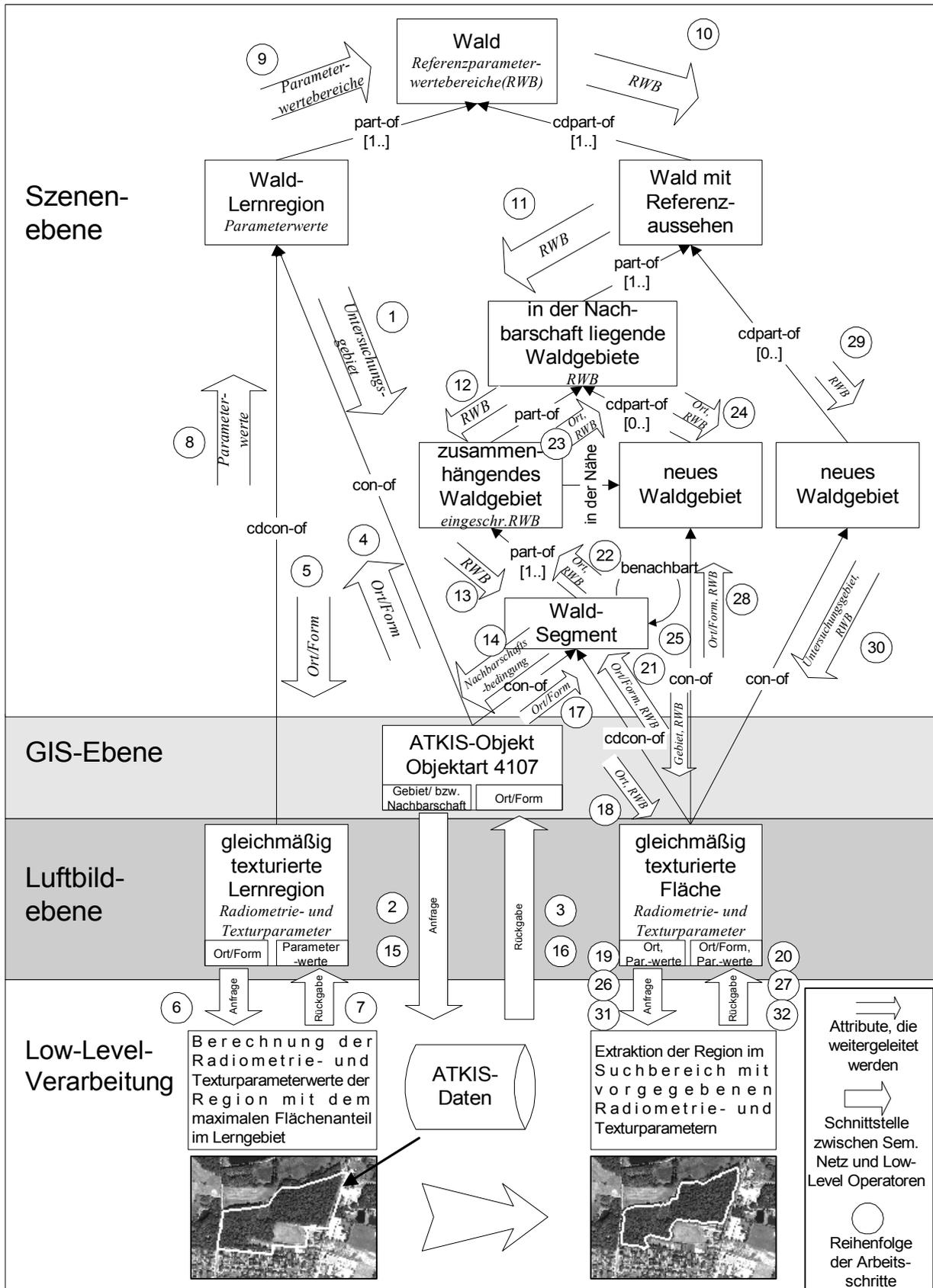


Abbildung 18: Konzeptnetz zur Extraktion von Waldgebieten mit GIS-Vorwissen

Diese werden an den Knoten des Semantischen Netzes übergeben (Schritt 7). Bottom-up werden die Parameterwerte zum Knoten *Wald-Lernregion* übermittelt. Daraufhin wird die Hypothese *Wald-Lernregion* komplett instanziiert. Die Parameterwerte werden bottom-up an die Hypothese *Wald* weitergereicht (Schritt 9). Nun wird eine weitere Hypothese

Wald-Lernregion aufgebaut und Schritt 1-9 werden erneut durchgeführt. Auf diese Art und Weise entstehen nach und nach für alle ATKIS-Objekte des Untersuchungsgebietes Lernregionen mit den entsprechenden Parameterwerten. Dies wird so lange durchgeführt, bis keine weiteren ATKIS-Objekte der Objektart 4107 für das betrachtete Gebiet mehr vorhanden sind. Aus allen Parameterwerten der Lernregionen werden im Knoten *Wald* Referenzparameterwertebereiche (RWB) ermittelt.

An diesem Punkt der Interpretation ist nun das Aussehen (Radiometrie und Textur) der untersuchten Objektart Wald in Form der Referenzparameterwertebereiche ermittelt worden, indem als Vorwissen die ATKIS-Daten verwendet wurden.

Im nächsten Schritt werden die Referenzparameterwertebereiche über den zweiten Strang top-down propagiert. Es wird über die Relation *cdpart-of* die Hypothese *Wald mit Referenzaussehen* erstellt. Danach werden nacheinander jeweils über die *part-of* Relationen die Hypothesen *in der Nachbarschaft liegende Waldgebiete*, *zusammenhängendes Waldgebiet* und schließlich *Wald-Segment* erstellt. Die Referenzparameterwertebereiche werden jeweils top-down weitergegeben. Bei der Hypothese *Wald-Segment* angekommen, wird nun ähnlich wie bei der *Wald-Lernregion* zunächst über die Relation *con-of* wieder ein ATKIS Objekt der Objektart 4107 aus dem Untersuchungsgebiet angefordert. Aus der ATKIS-Datenbank wird Ort und Form des Objektes zurückübermittelt und bottom-up zur Hypothese *Waldsegment* übergeben. Über *cdcon-of* wird die Hypothese *gleichmäßig texturierte Fläche* erstellt und die ermittelten Attribute, Ort und Form des Segmentes einerseits und die Referenzparameterwertebereiche andererseits, werden dieser übergeben.

Von diesem Knoten aus wird ein Bildverarbeitungsoperator aufgerufen, an den die aktuellen Attribute übergeben werden. Dieser Operator extrahiert innerhalb der geometrischen Begrenzung des ATKIS-Objektes die Fläche, deren Textur- und Radiometrieparameter innerhalb der vorgegebenen Bereiche liegen. Als Rückgabewerte liefert er die Parameterwerte der tatsächlich extrahierten Fläche. Diese werden bottom-up an den Knoten *Wald-Segment* übergeben. Damit enthält dieser Knoten die Parameterwerte des tatsächlich extrahierten Segmentes. Dieses Prozedere wird top-down wiederholt. Das nächste *Wald-Segment*, für das eine Hypothese erstellt wird, ist zusätzlich über die attributierte Relation *benachbart* mit dem vorherigen *Wald-Segment* verbunden. Das führt dazu, dass bei der Anforderung des nächsten ATKIS-Objektes aus der Datenbank als zusätzliche Randbedingung die direkte Nachbarschaft zum vorangegangenen Objekt verwendet wird. Nach und nach werden auf diese Weise alle benachbarten *Wald-Segmente* aus der ATKIS-Datenbank angefordert, überprüft und zusammen mit den jeweiligen Attributwerten als Teil des Knotens *zusammenhängendes Waldgebiet* gespeichert. Aus den Attributwerten aller Segmente eines zusammenhängenden Waldgebietes werden neue eingeschränkte Referenzparameterwertebereiche errechnet.

Ist dieser Vorgang abgeschlossen, wird unterhalb des Knotens *in der Nachbarschaft liegende Waldgebiete* über die Relation *cdpart-of* die Hypothese *neues Waldgebiet* erstellt, die zusätzlich über die attributierte Relation *in der Nähe* an das *zusammenhängende Waldgebiet* gekoppelt ist. Als Ort wird eine Pufferzone um das zusammenhängende Waldgebiet verwendet. Dieser ist in Abhängigkeit von der Größe des verwendeten Untersuchungsgebietes gewählt. Für Textur und Radiometrie des neuen Waldgebietes werden die neuen eingeschränkten Referenzparameterwertebereiche verwendet.

Hintergrund hierfür ist die Annahme, dass gleichartige Wälder, die räumlich näher zusammenliegen, auch in den Bildern ein ähnlicheres Aussehen (Textur, Radiometrie) aufweisen. Insbesondere vor dem Hintergrund der oben beschriebenen möglichen Unterschiede in der Beleuchtung innerhalb der Bilder führt diese Vorgehensweise zu einer zweckmäßigen Einschränkung der Wertebereiche. Wenn aufgrund einer streifenweisen Bildaufnahme (wie bei Luftbildbefliegungen üblich) die Änderungen primär von Streifen zu Streifen auftreten, so muss dies in der Berechnung der Pufferzone mit berücksichtigt werden.

Mit diesen Randbedingungen werden die Attribute top-down an die neu erstellte Hypothese *gleichmäßig texturierte Fläche* übergeben und an den Bildverarbeitungsoperator zur Extraktion eines neuen Waldgebietes weitergeleitet. Auf diese Weise werden Waldgebiete im Pufferbereich extrahiert.

Nachdem die Hypothesen *in der Nachbarschaft liegende Waldgebiete* als Teile von *Wald mit Referenzaussehen* extrahiert worden sind, folgt in einem letzten Schritt top-down die Aufstellung der Hypothese *neues Waldgebiet* entlang der Relation *cdpart-of* (Schritt 29). Wiederum mit den Attributen Referenzparameterwertebereiche für Radiometrie und Textur und mit den Angaben des Untersuchungsgebietes sollen die restlichen bislang noch nicht erfassten Waldbereiche extrahiert werden, indem wiederum die Hypothese *gleichmäßig texturierte Fläche* aufgestellt wird.

Da im Verlauf der Gebietsextraktionen unterschiedliche Parameterwertebereiche propagiert werden, kann es vorkommen, dass Gebiete extrahiert werden, die einander überlappen. Daher wird bei jeder Extraktion eines Gebietes diese Fläche als „genutzt“ markiert, so dass sie nicht ein weiteres mal zugeordnet werden darf. Die Grenze des neu extrahierten Gebietes wird im Falle einer Überlappung an die Grenze des bereits extrahierten angepasst. Somit wird der Suchbereich im Verlauf der Interpretation immer weiter eingeschränkt.

Das hier gezeigte Beispiel zeigt ein mehrstufiges Verfahren. In einem ersten Schritt werden basierend auf GIS-Daten Parameterwerte für die Textur und Radiometrie angelernt. Daraufhin werden diese verwendet, um aus den Bilddaten im Untersuchungsgebiet Waldgebiete zu extrahieren. Dabei werden zuerst genau diese Gebiete aus der GIS-Datenbank überprüft. Das Ergebnis dieses Schrittes ist somit eine Verifikation der GIS-Daten. Daraufhin werden jeweils in der Nähe der verifizierten Waldgebiete aus den GIS-Daten neue Waldgebiete gesucht, die ähnliche radiometrische und textuelle Eigenschaften aufweisen, indem die Parameterwertebereiche zuvor eingeschränkt worden sind. Zum Schluss werden in den restlichen Regionen neue Waldgebiete gesucht.

Abbildung 19 zeigt das Ergebnis einer derartigen Interpretation angewendet auf ein Schwarzweißluftbild der Auflösung 1m/Pixel. Als Texturparameter wurden lokale Varianz und lokaler Kontrast, zur Gebietsextraktion ein Flächenwachstumsverfahren verwendet. In den Ergebnis-Regionen wurden eingeschlossene Löcher entfernt.

Auf der linken Seite sind die ATKIS-Objekte der Objektart 4107 dargestellt, auf der rechten Seite die Objekte nach der Interpretation. Wie zu erkennen ist, befindet sich oben in der Mitte ein Segment, das in ATKIS als Wald deklariert ist, jedoch im Luftbild eindeutig keinen Wald darstellt. Korrekterweise ist das Segment im Ergebnis nicht als Wald interpretiert worden. Die restlichen Waldregionen wurden an die tatsächliche Form angepasst. Wie insbesondere am obersten Segment zu erkennen ist, werden durch das Flächenwachstumsverfahren des Bildverarbeitungsoperators auch teilweise Baumreihen erfasst. Im betrachteten Gebiet sind nur Segmente angepasst worden, die vorher in ATKIS vorhanden waren. Neue Waldgebiete kommen im betrachteten Gebiet nicht vor.



ATKIS-Daten

Ergebnis

Abbildung 19: Ergebnis einer Waldextraktion basierend auf ATKIS-Daten

Die Ergebnisse des hier vorgestellten Verfahrens zeigen, dass es geeignet ist, um Waldgebiete aus dem ATKIS-Basis-DLM zu überprüfen und ihre Lagegenauigkeit zu verbessern. Das Verfahren funktioniert nur, wenn die Waldgebiete näherungsweise gleichmäßig texturiert sind. Dies ist dadurch zu erreichen, dass die Auflösung der bearbeiteten Bilder nicht zu hoch gewählt wird, da mit feiner werdender Auflösung die Gebiete immer ungleichmäßiger texturiert werden. Bei der Extraktion neuer Waldgebiete ergibt sich in Schwarzweißbildern zudem das Problem, dass teilweise weitere Regionen, die nicht der Objektart Wald zuzuordnen sind, extrahiert werden können.

3.5 Multitemporale Interpretation

3.5.1 Einführung und Voraussetzungen

Zusätzlich zur Interpretation von Fernerkundungsdaten für einzelne Zeitpunkte ergibt sich oftmals die Notwendigkeit, eine Interpretation für mehrere Zeitpunkte durchzuführen. So besteht diese Notwendigkeit häufig bei der Interpretation von Vegetationsflächen, um die Entwicklung, die oftmals nur schwer vorhersagbar ist, zu überwachen. Aber auch die Aktualisierung von GIS-Daten wird durchgeführt, indem in bestimmten Zeitabständen eine Überprüfung mit Hilfe von Fernerkundungsdaten durchgeführt wird.

Diese Anwendungen haben eines gemeinsam: Sie führen Interpretationen in multitemporalen Daten durch. Im ersten Ansatz kann eine multitemporale Interpretation durchgeführt werden, indem die Verfahren der monotemporalen Interpretation auf die einzelnen Zeitpunkte Anwendung finden. Dieser Ansatz würde zu einer Verkettung von Einzelergebnissen führen, die zusammengenommen das Ergebnis der multitemporalen Interpretation bilden.

Beobachtet man jedoch erfahrene Auswerter bei einer multitemporalen Interpretation, erkennt man, dass sie häufig für die Bedeutungszuweisung der jeweiligen Regionen zusätzlich zu den aus den aktuellen Daten erkennbaren Eigenschaften weiteres Wissen verwenden, das sie aus den Interpretationen der anderen Zeitpunkte gewonnen haben. Für die Schlüssigkeit der jeweiligen Interpretation werden nicht nur die direkt aus den aktuellen Bildern zu erkennenden Eigenschaften überprüft, sondern auch das zeitliche Zusammenpassen der Interpretationen.

Die Verwendung dieses temporalen Wissens kann dazu führen, dass von vornherein bestimmte Interpretationsmöglichkeiten ausgeschlossen oder eher erwartet werden als andere. Wenn die Interpretation von bestimmten Regionen aufgrund der Eigenschaften des aktuell verwendeten Bildes nicht eindeutig ist, kann das temporale Wissen zusätzlich den Ausschlag für die eine oder andere Möglichkeit geben. Daneben kann die Interpretationsgeschwindigkeit gesteigert werden, wenn aufgrund des temporalen Wissens erst die wahrscheinlicheren Interpretationsmöglichkeiten überprüft werden und danach erst die übrigen.

Die Nutzung des temporalen Wissens kann bei einer automatischen multitemporalen Interpretation ebenfalls zu den genannten Vorteilen führen. Dazu ist es notwendig, das temporale Wissen in einer für das Interpretationssystem verständlichen Form zu beschreiben.

Das Einbringen und Nutzen von temporalem Wissen in die Interpretation ist dann sinnvoll, wenn die Nutzung der temporalen Zusammenhänge für die zu untersuchenden Objektarten zu einer Einschränkung der möglichen Landschaftsveränderungen führt. Wenn die temporalen Zusammenhänge derart sind, dass sich jede Objektart bei der Interpretation eines weiteren Zeitpunktes gleichwahrscheinlich in jede andere Objektart verändern kann, kann auf das Einbringen des temporalen Wissens verzichtet werden, da es keine Zusatzinformationen liefert.

Eine wichtige Voraussetzung für die Festlegung der Zeitpunkte, zu denen die Fernerkundungsdaten aufgenommen werden sollten, ist die Beobachtbarkeit der Objektveränderungen. Wenn z.B. zu einem Zeitpunkt die Veränderung des betrachteten Objektes durch Verdeckung oder einer zu geringen Auflösung der Fernerkundungsdaten nicht beobachtbar ist, sollte dieser für die Interpretation nicht verwendet werden.

3.5.2 Interpretationsstrategien

Bei der Interpretation von multitemporalen Bildern gibt es mehrere Möglichkeiten, wie die Bilder in den Interpretationsprozess einbezogen werden können. Nachfolgend werden zwei Strategien unterschieden, die je nach vorgegebener Aufgabenstellung unterschiedlich gut geeignet sind.

3.5.2.1 Sequenzielle Interpretation (Monitoring)

Die Strategie der *Sequenziellen Interpretation* ist in Abbildung 20 dargestellt. Zunächst werden die Bilddaten für den initialen Zeitpunkt z verwendet. Zusammen mit der monotemporalen Wissensbasis wird eine Interpretation durchgeführt. Unter monotemporaler Wissensbasis wird das Konzeptnetz mit dem kompletten Wissen mit Ausnahme des temporalen Wissens verstanden. Das Ergebnis der wissensbasierten Interpretation ist eine Szenenbeschreibung für den untersuchten Zeitpunkt z . Die Szenenbeschreibung liegt als Semantisches Netz vor, das komplett instanziiert worden ist.

Danach wird zur Vorbereitung der Interpretation für den nächsten Zeitpunkt $z+1$ eine Prädiktion durchgeführt. Diese basiert auf der Szenenbeschreibung des Zeitpunktes z und erstellt in Abhängigkeit von der eingebrachten temporalen Wissensbasis für die interpretierten Gebiete neue Hypothesen. Diese beschreiben, wie die interpretierten Gebiete zum Zeitpunkt $z+1$ aussehen könnten. Die prädizierten neuen Hypothesen werden in der wissensbasierten Interpretation für den Zeitpunkt $z+1$ zusammen mit den neuen Bilddaten verwendet, jedoch mit der gleichen monotemporalen Wissensbasis wie vorher.

Die hier dargestellte Strategie eignet sich gegenüber der nachfolgend beschriebenen der *Parallelen Interpretation* besser zum Monitoring von Gebieten, da zur Interpretation eines Zeitpunktes keine Informationen über nachfolgende Zeitpunkte verwendet werden. Für jeden Zeitpunkt wird eine Interpretation komplett zu Ende geführt. Erst danach erfolgt basierend darauf eine neue Interpretation. Es muss kein Wissen über zukünftige Zustände vorhanden sein, um eine Interpretation des aktuellen Zustandes durchführen zu können. Andererseits kann eine Interpretation eines zurückliegenden Zeitpunktes nicht von einer neuen beeinflusst werden. Eine falsch durchgeführte Interpretation für einen bestimmten Zeitpunkt zieht eine von falschen Voraussetzungen ausgehenden Prädiktion von Hypothesen für die Folgezustände nach sich. Wenn beispielsweise die Interpretation für einen neuen Zeitpunkt aufgrund von eindeutigen radiometrischen Merkmalen eine alte Interpretation als falsch aufdeckt, kann die alte Interpretation dennoch nicht nachträglich korrigiert werden.

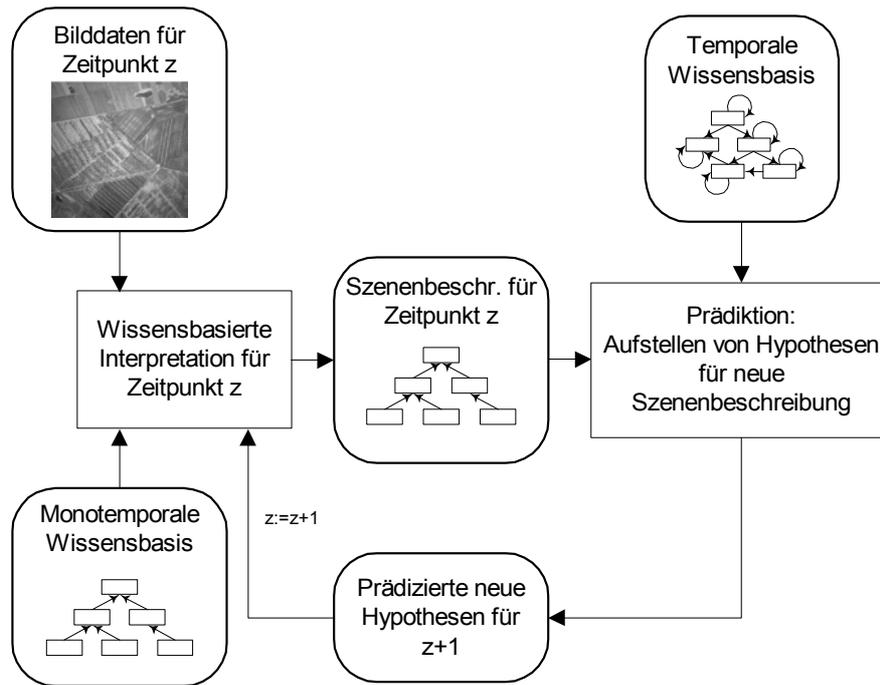


Abbildung 20: Sequenzielle Strategie der multitemporalen Interpretation

3.5.2.2 Parallele Interpretation

In Abbildung 21 ist die Strategie der multitemporalen *Parallelen Interpretation* dargestellt. Diese Strategie eignet sich primär zur Interpretation von Veränderungen in Bildsequenzen, die im Zusammenhang und gemeinsam interpretiert werden müssen. Im Gegensatz zu der *Sequenziellen Strategie* erfolgt hier die Verarbeitung der verschiedenen Interpretationszeitpunkte nicht nacheinander, sondern gleichzeitig. Die Bilddaten der unterschiedlichen Zeitpunkte werden gleichzeitig für die Interpretation bereitgestellt. Die monotemporale Wissensbasis wird zusammen mit der temporalen dazu verwendet, im Verlauf der Interpretation ein Semantisches Netz aufzubauen, das Szenenbeschreibungen für die einzelnen Zeitpunkte enthält, die über temporale Beziehungen miteinander verknüpft sind. Die temporalen Beziehungen stellen damit bereits während der Instanzierung Randbedingungen dar, die die einzelnen Szenenbeschreibungen erfüllen müssen. Aus diesem Grunde wird die Instanzierung so lange fortgesetzt, bis alle Bedingungen, sowohl die nichttemporalen als auch die temporalen, erfüllt sind. Das Ergebnis sind Instanzennetze mit Szenenbeschreibungen unterschiedlicher Zeitpunkte.

Die dargestellte Strategie der *Parallelen Interpretation* hat gegenüber der *Sequenziellen* den Vorteil, dass im Falle von Fehlinterpretationen für einen Zeitpunkt die Fehler nicht notwendigerweise zu Fehlinterpretationen für die nachfolgenden Zeitpunkte führen müssen. Wenn die Interpretation eines späteren Zeitpunktes zu einem mit dem verwendeten Konzept nicht zu vereinbarenden Ergebnis führt, kann rückwärts die Interpretation des zurückliegenden Zeitpunktes modifiziert werden, so dass das Ergebnis schlüssig wird. Der Nachteil dieser Strategie besteht darin, dass zur Interpretation eines Zeitpunktes immer alle weiteren Zeitpunkte mit verwendet werden müssen, und daher der Rechenaufwand stark ansteigt. Für die Interpretation der letzten Zeitpunkte bietet diese Strategie gegenüber der *Sequenziellen Interpretation* nur geringe Vorteile bei sehr viel höherem Rechenaufwand, da beide Strategien ausschließlich Informationen der vorherigen Zeitpunkte verwenden.

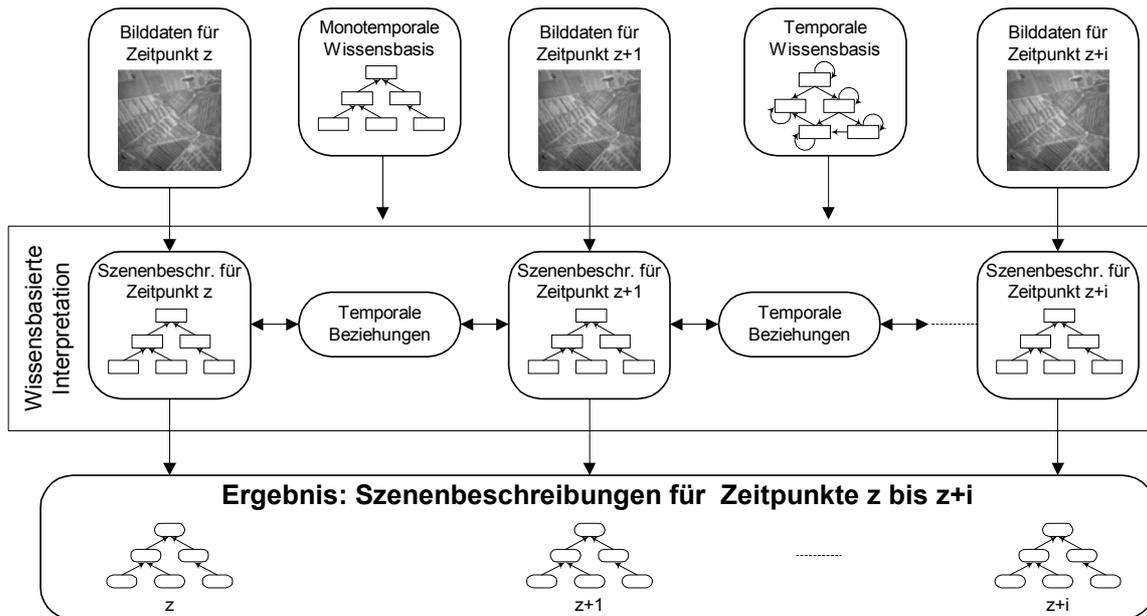


Abbildung 21: Parallele Strategie der multitemporalen Interpretation

Aus den obigen Betrachtungen folgt, dass sich die Strategie der *Sequenziellen Interpretation* für Monitoring-Aufgaben (z.B. Umwelt-Monitoring) eignet, da die alleinige Interpretation des neuesten Zeitpunktes im Vordergrund steht und in der Regel eine Korrektur der Interpretationen vergangener Zeitpunkte sekundär ist. Wenn demgegenüber Bildsequenzen vorhanden sind, die gemeinsam ausgewertet werden müssen, sollte der erhöhte Rechenaufwand der *Parallelen Interpretation* in Kauf genommen werden.

3.5.3 Symbolische Beschreibung multitemporalen Wissens

Eine auf Fernerkundungsdaten basierende multitemporale Interpretation gibt immer nur den Zustand der Landschaft für einzelne diskrete Zeitpunkte wieder. Diese Zeitpunkte decken sich mit den Aufnahmezeitpunkten der verwendeten Fernerkundungsdaten. Die möglichen oder wahrscheinlichen landschaftlichen Veränderungen, die sich zwischen diesen Zeitpunkten ergeben, können in vielen Fällen vorhergesagt und daher auch vorab beschrieben werden. Diese Möglichkeit der Vorhersage kann dazu verwendet werden, multitemporale Interpretationen für jeden einzelnen Zeitpunkt nicht unabhängig voneinander durchzuführen, sondern miteinander zu verknüpfen und so weitere Einschränkungen für die Interpretation zu erhalten. Die Gesamtinterpretation kann auf diese Weise robuster und effizienter durchgeführt werden.

Die Beschreibung von temporalen Veränderungen soll, ebenso wie die übrige Wissensrepräsentation, in einer expliziten Form erfolgen. Hierzu wird ein Zustandsübergangsdiagramm eingeführt. Dieses beschreibt Übergänge von diskreten Zuständen, die möglich oder wahrscheinlich sind. Unter Zustand wird eine Klasse im Kontext der multitemporalen Interpretation verstanden. Da bestimmte Regionen im zeitlichen Verlauf ihre Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse ändern können, wird hier von unterschiedlichen Zuständen der betrachteten Regionen gesprochen.

Das Zustandsübergangsdiagramm besteht aus Konzeptknoten und Relationen. Die Konzeptknoten beschreiben die unterschiedlichen Zustände, die die Regionen annehmen können. Die Beschreibung von zeitlichen Veränderungen ist nur für Knoten aus der Szenenebene sinnvoll. Die Relationen beschreiben die Übergänge zwischen den Knoten. Sie sind gerichtet und können auf diese Art und Weise die Richtung der jeweiligen Veränderung darstellen. Restriktionen bezüglich der Anzahl der erlaubten Relationen oder deren Richtung gibt es nicht. So können sich im Gegensatz zu den Semantischen Netzen im Zustandsübergangsdiagramm auch Zyklen bilden.

Im Verlauf der multitemporalen Interpretation kann für jeden Zeitpunkt jedes zu interpretierende Gebiet genau einem Zustand des Zustandsübergangsdiagramms zugeordnet werden. In Abhängigkeit von den enthaltenen Zustandsübergängen kann daraufhin prädictiert werden, welche neuen Zustände das betrachtete Objekt für den nächsten Zeitpunkt annehmen kann. Ein Beispiel für ein Zustandsübergangsdiagramm ist in Abbildung 30 dargestellt.

Es ist sinnvoll, dass die Relationen als Attribut eine Zeitdauer beinhalten. Diese gibt an, wie lange der Übergang von einem Zustand zum nächsten dauern kann. In Verbindung mit den bekannten Aufnahmezeitpunkten der verwendeten Fernerkundungsdaten ist es mit diesem Attribut möglich, eine Abschätzung durchzuführen, welche Zustände ein Segment für einen neuen Beobachtungszeitpunkt annehmen kann.

Weiterhin ist ein Attribut sinnvoll, das angibt, wie hoch die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen den Knoten ist. Primär sind die Differenzen der Wahrscheinlichkeiten zueinander von Bedeutung, da abgeschätzt werden soll, welcher Zustandsübergang von einem Zeitpunkt ausgehend im Vergleich zu allen anderen am wahrscheinlichsten ist.

3.5.4 Implementierung in AIDA

In [21]:51ff wird dargestellt, wie die Beschreibung des temporalen Wissens in einer für das wissensbasierte System verarbeitbaren Form zusammen mit notwendigen Strategien weiterentwickelt und die Implementierung in AIDA vorgenommen wurde. Dabei wird das Zustandsübergangsdiagramm, welches das temporale Wissen enthält, in das Semantische Netz integriert. Die Zustände des Diagramms werden genauso wie die Klassen als Knoten im Semantischen Netz beschrieben. Die Zustandsübergänge werden durch Relationen beschrieben. Hierfür wurde eine neue Relation eingeführt: die *temporale Relation*. Ebenso wie die *attribuierten Relationen* werden Knoten einer Ebene durch die *temporale Relation* horizontal miteinander verbunden.

Die Knoten des Semantischen Netzes wurden um einige Beschreibungen erweitert, um die multitemporale Interpretation zu ermöglichen. Zum einen erhielt jeder Knoten einen *Zeitstempel*, der der Dokumentation des Zeitpunktes im Verlauf der Interpretation dient. Weiterhin kann für jeden Zustand eine *Zustandsdauer* definiert werden. Da diese Angabe in der Regel nicht genau gemacht werden kann, werden Intervalle für die Beschreibung dieser Angabe verwendet. So kann beispielsweise die Unkenntnis über die *Zustandsdauer* mit dem Intervall $[0..∞]$ beschrieben werden. Weiterhin kann ein *Anfangszeitpunkt* angegeben werden. Als letzte Angabe wurde die *Zustandswahrscheinlichkeit* eingeführt, welche die a priori Auftretenswahrscheinlichkeit des Zustandes beschreibt.

Auch die *temporale Relation* erhielt einige zusätzliche Angaben: Zusätzlich zu den die Ausgangs- und Folgezustände beschreibenden Knoten erhielt jede *temporale Relation* eine Angabe über die *Dauer des Zustandsüberganges*. Wie der Name schon sagt, wird hiermit die Zeitdauer beschrieben, in der der Übergang vom Ausgangs- in den Endzustand erfolgen kann. Auch diese Angabe wird mit Hilfe eines Intervalls für die minimale und die maximale Übergangszeit dargestellt. Schließlich kann für die *temporale Relation* auch eine a priori Wahrscheinlichkeit angegeben werden: die *Zustandsübergangswahrscheinlichkeit*.

Die Angaben zu den Wahrscheinlichkeiten, sowohl für die *Zustandswahrscheinlichkeit* in den Knoten als auch für die *Zustandsübergangswahrscheinlichkeit* in den Relationen, können nur aus statistischen Messungen oder aus Expertenwissen oder –schätzungen stammen. Liegen diese nicht vor, werden jeweils alle Wahrscheinlichkeiten auf gleiche Werte gesetzt und damit als gleichwahrscheinlich angenommen.

Die Strategie zur multitemporalen Interpretation hat das Ziel, eine geeignete Auswertung der möglichen Zustandsübergänge vorzunehmen, um daraus die Prädiktion von Folgezuständen durchzuführen. Ausgehend von einem aktuellen Zeitpunkt und einem aktuellen Zustand eines Gebietes sollen für den nächsten zu interpretierenden Zeitpunkt geeignete Folgezustände ermittelt werden. Hierzu wird für alle Zustände des Zustandsübergangsdiagramms aus den Zustands- und Zustandsübergangsdauern der früheste Anfangszeitpunkt und der späteste Endzeitpunkt berechnet. Mit den Bedingungen, dass einerseits ein Zustand nur dann ein möglicher Nachfolger des Ausgangszustandes ist, wenn er innerhalb des berechneten Intervalls liegt, und andererseits die vordefinierten Zeiten eines möglichen Auftretens des Zustandes eingehalten werden müssen, können Folgezustände prädiiziert werden.

3.5.5 Bewertungssystem

Im Verlauf einer Interpretation kann es, wie in Abschnitt 2.2.9 beschrieben, zu konkurrierenden Hypothesen kommen. Dies geschieht dann, wenn die Fortsetzung der Interpretation nicht eindeutig ist. Wenn beispielsweise für ein bestimmtes Segment, das aktuell zu interpretieren ist, mehrere mögliche Zuordnungen existieren, wird der weitere Verlauf davon beeinflusst werden, welche Zuordnung getroffen wurde. Um herauszufinden, welche Möglichkeit zum besten Ergebnis führt, müssten im Idealfall alle ausprobiert werden. Dies kann jedoch sehr schnell auf eine ineffizient hohe Anzahl zu verifizierender Möglichkeiten führen (siehe Abschnitt 2.2.9). Um dies zu vermeiden, ist eine Bewertung im Verlauf der Interpretation notwendig. Das Ziel der Bewertung ist es, beim Auftreten von Mehrdeutigkeiten die wahrscheinlichere herauszufinden und so eine Entscheidungshilfe zu erhalten, welche Möglichkeit weiterverfolgt werden sollte. Dies bedeutet, dass im Verlauf der Interpretation die Suchbaumknoten bewertet werden müssen, um beim Aufspalten des Suchbaumes den Knoten, der am erfolgversprechendsten ist, weiterverfolgen zu können. In [21]:64ff ist ein Bewertungssystem entwickelt worden, das eine Bewertung der aktuellen Interpretationszustände durchführt und dabei auch temporales Wissen berücksichtigen kann.

4 Interpretation von industriell genutzten Mooregebieten

In diesem Kapitel wird auf die Interpretation von industriell genutzten Mooregebieten eingegangen. Um das Ziel einer automatischen Interpretation dieser Gebiete zu erreichen, ist es notwendig, Expertenwissen über das zu untersuchende Gebiet in das Interpretationssystem zu integrieren und zu nutzen. Daher werden zunächst in Abschnitt 4.1 Grundlagen über das Moor beschrieben. Sie entsprechen einem Teil des Expertenwissens und bilden die Basis, aus der schließlich das Modell für die automatische Interpretation erstellt wird. Danach wird in Abschnitt 4.2 die manuelle Interpretation von Luftbildern kurz dargestellt. Dies ist von Bedeutung, weil auch hieraus Rückschlüsse auf die Strategie der automatischen Interpretation gezogen wurden. In Abschnitt 4.3 wird schließlich die im Rahmen dieser Arbeit erstellte automatische Interpretation beschrieben. Dazu werden folgende in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Ansätze verwendet: Die Strategie, die Interpretation innerhalb vorgegebener Segmentgrenzen durchzuführen, indem unter Verwendung von Merkmalsanalyseoperatoren nach strukturellen Merkmalen gesucht wird und die Nutzung von temporalem Wissen zur Einschränkung des Suchbereiches.

4.1 Grundlagen Moor

Als Moor wird ein Gelände bezeichnet, das im unentwässertem Zustand eine mindestens 30cm starke Schicht oder Schichtfolge von Torfen aufweist [19]. Der Anteil der organischen Substanz liegt dabei mindestens bei 30%. Als Torf wird das Zersetzungsprodukt überwiegend pflanzlicher Substanzen bezeichnet. Moore entstehen in Gebieten mit einem großen Wasserüberschuss. Dieser begünstigt das Wachstum von feuchtigkeitsliebenden Pflanzen und schafft anaerobe Verhältnisse, die den mikrobiellen Abbau von Pflanzenresten hemmen und dadurch zur Torfbildung führen.

Moore können nur in Gebieten entstehen, die entsprechende hydrologische und klimatischen Verhältnisse aufweisen. Das trifft insbesondere auf die Länder Russland, Finnland, Schweden und Kanada zu. In der Bundesrepublik Deutschland befinden sich ca. 14.790km² Moorflächen (Stand 1989, [19]), was einem Anteil von 4,14% an der Gesamtfläche entspricht. In der Bundesrepublik ist Niedersachsen mit ursprünglich ca. 3.300km² Hoch- und ca. 3.000km² Niedermooren das Bundesland mit den meisten Moorflächen [63]. Eine Inventur des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung im Jahre 1981 ergab für Niedersachsen 2.500km² Hoch- und 2.000km² Niedermoorflächen.

4.1.1 Entstehung

Voraussetzung für die Entstehung von Mooren sind Standorte mit einem ständigen oder überwiegend vorherrschenden Wasserüberschuss. Die ersten Moore entstanden bereits vor etwa 400 bis 320 Millionen Jahren und waren in ihrem Urzustand in einem Stadium, das zwischen Land und Wasser eingeordnet werden kann. Der Wassergehalt bewegte sich im Bereich von 70 bis 95%.

Die heutigen Moore sind vor etwa zehn- bis zwanzigtausend Jahren aus Schmelzwasserseen und Feuchtgebieten der letzten Eiszeit entstanden. Die Schmelzwasserseen waren nährstoffreich und am Untergrund meist durch Mineralschichten vom Grundwasser getrennt, was insbesondere für die Entstehung der Hochmoore von Bedeutung war. Mit zunehmender Erwärmung erfolgte eine Verlandung der Seen. Es entwickelte sich immer mehr Vegetation, die sich nach und nach am Grund des Sees ablagerte. Durch unvollständige Zersetzungen der Pflanzenreste entstanden erste Torfschichten. Durch Sedimentation rückte die Ufervegetation von den Rändern zur Mitte hin immer weiter vor. Die charakteristischen Pflanzendecken, die im Verlauf der Zeit entstanden, waren Unterwasser- und Schwimmblattgesellschaften, Schilfröhricht, Großseggenbüschel, Weidengebüsch und schließlich auch Erlenbruchwälder. Aus ihnen entstanden jeweils einzelne Torfschichten. Im Verlauf der Entwicklung hob sich die Pflanzendecke immer mehr. Das Niedermoor war entstanden. Neben den hier beschriebenen Verlandungsniedermooren gibt es noch andere Arten von Niedermooren, die sich in der Entstehung unterscheiden, wie Versumpfungs- und Quellniedermoore, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll.

Während sich derartige Niedermoore in Senken, in denen sich nährstoffreiches Wasser angesammelt hat, bilden können, sind die Anforderungen an die Bedingungen für die Bildung von Hochmooren spezieller. Liegt eine positive Wasserbilanz vor, d.h. übersteigt die Menge des Niederschlagswassers die Menge des verdunstenden Wassers, und verteilen sich die Niederschläge mehr oder weniger gleichmäßig auf das ganze Jahr, kann sich aus dem Niedermoor ein Hochmoor entwickeln.

Durch den Überschuss an Niederschlagswasser stiegen die Torfschichten immer mehr aus dem nährstoffreichen Grundwasser empor. Dadurch, dass die Versorgung immer mehr durch das Niederschlagswasser erfolgte und immer weniger durch das Grundwasser, siedelten sich immer häufiger die weniger anspruchsvollen Kiefern und Birken an. Dieses Stadium der Moorentwicklung wird Übergangsmoor genannt.

Mit dem Anstieg der Torfschichten vermehrten sich die Torfmoose und Wollgrasarten. Torfmoose besitzen die Eigenschaft, Wasser wie ein Schwamm über ihre Poren bis zum zwanzigfachen ihres Trockengewichtes aufzusaugen und zu speichern. Der Moorkörper wuchs immer weiter aus dem nährstoffreichen Grundwasser heraus. Sein Nährstoffgehalt wurde immer geringer, der Boden versauerte immer stärker. Der Wald und andere niedermoortypische Vegetationsarten starben nach und nach ab. Nachdem schließlich der Kontakt zum Grundwasser vollständig abbrach, wurde das Gebiet ausschließlich vom nährstoffarmen Regenwasser versorgt. Ein Hochmoor (auch Regenwassermoor genannt) war entstanden. Die unteren Schichten des Moorkörpers, der im Wesentlichen aus Torfmoosen besteht, starben nach und nach durch Luft- und Lichtabschluss ab und vertorfte. Die übrige Vegetation im Hochmoor musste sich dem schnellen Höhenwachstum anpassen. Es entstand die sogenannte „urglasförmige“ Wölbung der Hochmoore. Das Eigengewicht presste die vertorfenden Pflanzenteile im Laufe der Zeit zusammen, was das Höhenwachstum auf etwa 1mm pro Jahr begrenzt.

4.1.2 Moortypen und ihre Pflanzen

4.1.2.1 Niedermoor

Niedermoore verfügen über nährstoffreiche Böden. Aufgrund dessen besitzen sie eine relativ üppige Vegetation. Der Torf ist dementsprechend nährstoffreich. Das Grund- oder Seewasser enthält im Vergleich zum Hochmoor mehr Sauerstoff. Dies führt zu einer raschen Zersetzung der abgestorbenen Pflanzenreste. Daher ist die Torfbildung nur gering.

Die im Niedermoor überwiegend vertretenen Pflanzenarten sind Großseggenriede. Weitere wichtige Pflanzenarten sind Rohrkolben, Schilf, Schwarzerle und Weide.

4.1.2.2 Übergangsmoor

Wie oben beschrieben, stellt das Übergangsmoor ein Zwischenstadium zwischen Nieder- und Hochmoor dar. Der Übergang zwischen Nieder- und Hochmoor vollzieht sich in mehreren verschieden großen Teilschritten und verläuft langsam. Es kann vorkommen, dass sich in einem Gebiet Hoch- und Niedermoorvegetation nebeneinander entwickeln.

Die Vegetation besteht außer aus Teilen der Hoch- und Niedermoorvegetation auch aus lockeren Kiefer- und Birkenbeständen.

4.1.2.3 Hochmoor

Verglichen mit dem kultivierten Umland stellen Hochmoore kalte Standorte dar. Bis weit in den Sommer hinein bleibt der Boden entweder gefroren oder zumindest sehr kalt [9]. Zudem sind Hochmoore extrem nährstoffarm. Der Boden ist mit einem pH-Wert < 4 stark sauer und sauerstoffarm. Entsprechend den unterschiedlichen Standortbedingungen weisen Hochmoore unterschiedliche Pflanzengesellschaften auf. Die Oberfläche ist gegliedert in wassergefüllte oder wasserdurchtränkte Vertiefungen (Schlenken) und in kissenförmige Erhöhungen (Bulten).

Die typischsten und vorherrschendsten Pflanzen im Hochmoor sind die Moose, insbesondere die Torf- oder Bleichmoose. In den Hochmooren Nordwestdeutschlands gibt es weit mehr als 50 Moosarten. Da sie die wesentliche Torfsubstanz bilden, sind sie gewissermaßen das Substrat für die übrigen Pflanzen. Die Schlenken sind meist mit grünen Torfmoosen bedeckt, die Bulten mit rötlichen oder bräunlichen.

Die auf die speziellen Umgebungsbedingungen angepasste Vegetation besteht darüber hinaus u.a. noch aus Wollgras, Moosbeere, Sonnentauarten und Binsen. Zum Rand der Hochmoorgebiete findet man auch Heidekrautgewächse, Birken und verkrüppelte Kiefern.

4.1.3 Nutzung durch den Menschen

Niedermoore sind zwischenzeitlich fast vollständig kultiviert worden. Sie werden heute überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Von den Hochmooren sind jedoch trotz großflächiger Kultivierung und Torfabbau bis heute noch naturnahe Flächen verblieben. Die Nutzung dieser Flächen durch den Menschen spaltet sich in Torfabbau und in landwirtschaftliche Nutzung auf.

Torf wurde bis ins 20. Jahrhundert durch steigende Holzknappheit von einem großen Teil der Bevölkerung als Brennstoff verwendet. Die Bedeutung als Brennstoff ist heute stark zurückgegangen, auch wenn Torf noch zum Heizen (auch in Kraftwerken) verwendet wird. Die primäre Nutzung von Torf findet sich heutzutage im Gartenbau.

Bevor Torfabbau auf den Hochmoorflächen betrieben werden kann, ist eine Entwässerung der entsprechenden Flächen notwendig. Dies geschieht durch das Ziehen von Entwässerungsgräben, die sowohl ringförmig um das Gebiet angelegt werden als auch parallel die Felder durchziehen können. Dadurch wird eine Veränderung der Vegetation eingeleitet. Dieser Vorgang wird als Degeneration bezeichnet. Die Flächen werden im Verlauf einer Degeneration primär von

Pfeifengras, Heidekraut, Birken und anderen Pflanzen besiedelt. Die Abtorfung einer Torfschicht von 1m benötigt ca. 5 Jahre. Zum Vergleich bedarf es ca. 1000 Jahre, bis diese Schicht auf natürliche Weise entsteht. Die Verfahren zum Torfabbau können in drei Kategorien eingeteilt werden: das Frästorfverfahren, das Stichtorfverfahren und der bäuerliche Handtorfstich. Diese Verfahren sollen im Folgenden kurz beschrieben werden:

Das Frästorfverfahren wird maschinell auf langgestreckten Feldern durchgeführt. Mit Hilfe von Frästorfmaschinen wird der Torfboden pro Arbeitsgang 1 – 2cm aufgeraut und auf Mittelwälle zusammengeschoben. Diese Mittelwälle werden anschließend zu Sammelrieten zusammengehäuft und dort bis zur Weiterverarbeitung im Torfwerk gelagert. Man unterscheidet die Flächen- und die Streifenabbaumethode. Bei der Flächenabbaumethode wird jeweils die gesamte Fläche gleichmäßig abgebaut. Bei der Streifenabbaumethode wird das Feld in etwa gleich große Streifen aufgeteilt. Maschinell bearbeitet wird jeweils jeder zweite Streifen. Die oberste, sporentragende Schicht der Streifen, die abgetorft werden sollen, wird auf die anderen zunächst nicht zu bearbeitenden Streifen verschoben. Diese Schicht wird als Bunkerde bezeichnet. Auf ihr wächst u.a. Pfeifengras und Heide. Nachdem die entsprechenden Streifen abgetorft worden sind, wird die Bunkerde von den unangetasteten Streifen auf die bearbeiteten zurückverlagert. Daraufhin wird der Torfabbau auf den anderen Streifen fortgeführt. Ist er in dem Gebiet schließlich vollständig abgeschlossen, kann die Bunkerde über das gesamte Gebiet verteilt werden. Die Streifenabbaumethode ist umweltschonender, da sie nach Beendigung des Abbaus durch die Bunkerde eine Grundlage für neu wachsende Vegetation hinterlässt, während die Flächenabbaumethode zunächst primär auf das „Hereintragen“ der Vegetation von den umliegenden Vegetationsflächen angewiesen ist und die Vegetationsentwicklung aufgrund dessen langsamer voranschreitet.

Beim Stichtorfverfahren (auch Sodentorfverfahren) wird nach der Entwässerung mit Planiermaschinen der Bewuchs entfernt. Danach wird in einer Flächenabbaumethode abgetorft. Mit Stichtorfmaschinen werden sogenannte Soden der Größe 15 x 15 x 42cm aus dem Boden gestochen und neben der Spur in Schlägen zum Trocknen gelegt. Das Trocknen dauert je nach Witterung mehrere Monate.

Die Abbaufelder des Handtorfstiches sind relativ klein. Nach einer Trocknung der Fläche wird auch hier die Bunkerde entfernt, der Torf von Hand aus dem Boden gestochen und in Soden entnommen. Nach der Torfentnahme wird die Bunkerde wieder aufgeschüttet. Der Eingriff erfolgt üblicherweise auf einer kleinen Fläche und ist i.d.R. kurz. Dies führt zu einer geringen Belastung der Fläche, das Moor kann sich meist selbst wieder regenerieren. Der Handtorfstich spielt heute eine sehr geringe Rolle bei den Abtorfungsverfahren, da es relativ selten angewendet wird. Spuren von Handtorfstich findet man jedoch auch heute noch vereinzelt.

Die landwirtschaftlichen Flächen in den ehemaligen Mooregebieten sind zum größten Teil durch die „Deutsche Hochmoorkultur“ entstanden. Bei dem Kultivierungsverfahren, das dabei Anwendung findet, wird als erster Schritt die Vegetation abgetragen und die jeweilige Fläche aufgekalkt und gedüngt. Die so entstandenen landwirtschaftlichen Flächen werden überwiegend als Grünland genutzt.

4.1.4 Degeneration und Gefährdung der Hochmoore

In Niedersachsen befindet sich heute keine Hochmoorfläche mehr in der ursprünglichen Gestalt. Die mehr oder weniger starken Veränderungen wurden durch Entwässerung, Kultivierung und Abtorfung hervorgerufen. Die Entwässerung der Hochmoorgebiete, die als Voraussetzung für den Torfabbau durchgeführt werden muss, stellt einen bedeutenden degenerativen Eingriff in die Hochmoorvegetation dar.

Durch die Entwässerung wird eine Veränderung der Vegetation bewirkt. Die Torfmoose gehen stark zurück und das Moor stellt sein Wachstum ein. Es siedeln sich nach und nach Heidekraut und Wollgräser an. Wird die Entwässerung fortgesetzt, führt dies zur Ansiedlung von Pfeifengras (unter bestimmten Voraussetzungen kann dieses Stadium wegfallen). Mit der Zeit wachsen einzelne Birken und Kiefern. Dies kann sich bis hin zum Moorwald entwickeln, wie in Abbildung 22 dargestellt. Die beschriebenen Vegetationsveränderungen entwickeln sich meist vom Gebietsrand zum Zentrum hin. Auch nach dem Ende des Torfabbaus ist ein derartiger Verlauf zu beobachten.

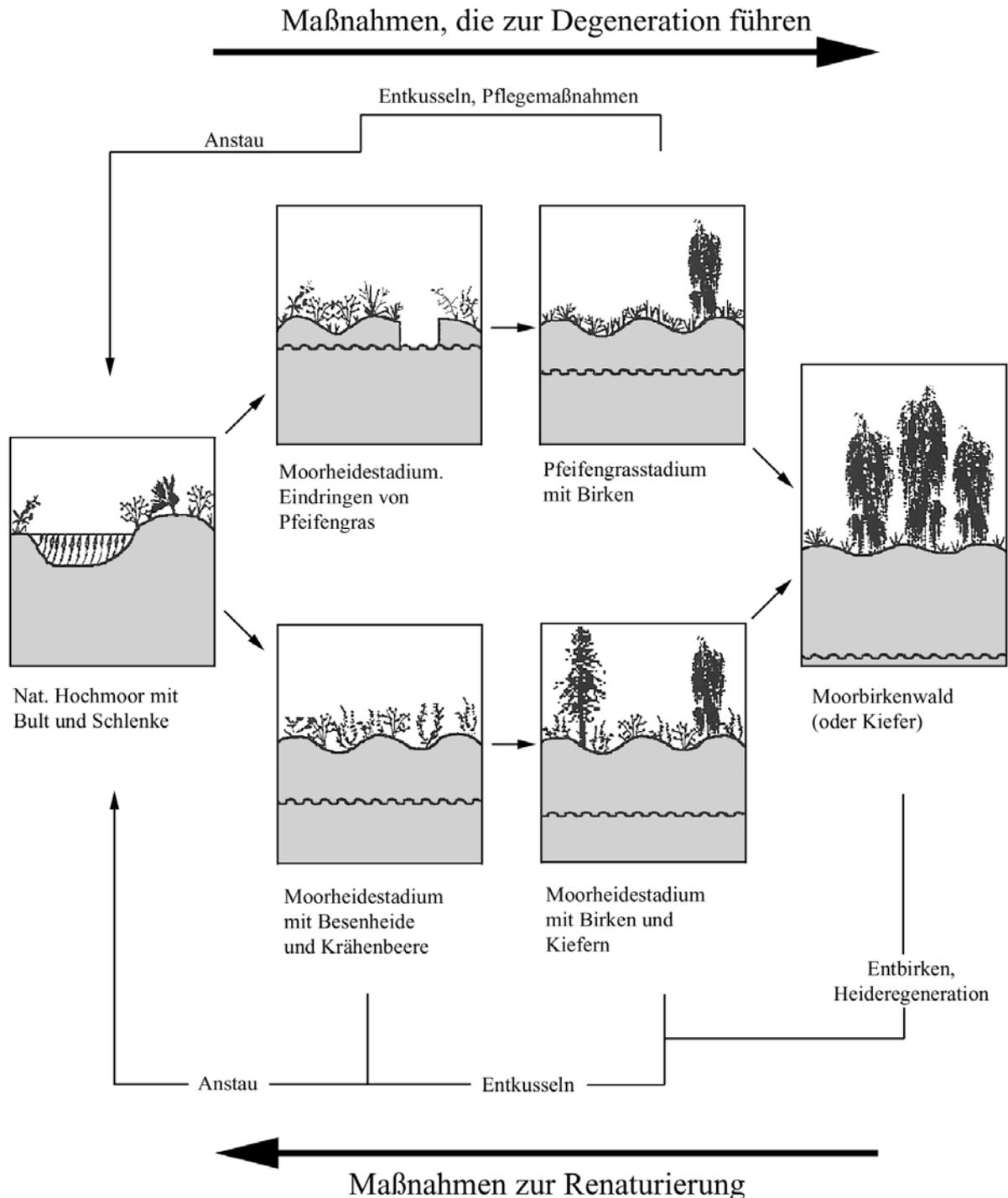
4.1.5 Moorschutz

Die besondere Bedeutung der Moore liegt in ihrem regional begrenzten Lebensraum, in dem sich eine spezialisierte und zum großen Teil in ihrem Bestand gefährdete Pflanzen- und Tierwelt befindet. Der in der Vergangenheit beobachtete drastische Rückgang der Mooregebiete hat in Niedersachsen, das den größten Anteil der Moorflächen in der Bundesrepublik aufweist und dessen Landschaft davon geprägt ist, zum Niedersächsischen Moorschutzprogramm geführt. Teil I wurde 1981 erstellt, Teil II 1986, und 1994 folgte eine Aktualisierung. Das Ziel des Programms ist es, alle noch vorhandenen naturnahen Hochmoorflächen zu erhalten, sowie veränderte Hochmoorflächen in einen Zustand zurückzuführen oder zu entwickeln, der dem natürlichen möglichst nahe kommt [42].

Laut ([55]:15) sollen als Naturschutzgebiet gesichert werden

- 530km² für den Naturschutz wertvolle Hochmoore.
- mindestens 300km² nach der industriellen Abtorfung zu renaturierende Hochmoorflächen.
- alle Kleinsthochmoore und Restflächen, die bereits heute geschützt sind (nach §28a des Niedersächsischen Naturschutzgesetzes). Sie bedürfen der Erweiterung durch Pufferzonen.
- das Hochmoorgrünland als eigenständiger Lebensraum.

Neue Abtorfgenhmigungen werden in der Regel nicht mehr vergeben. Hochmoorflächen, für die eine Abtorfgenhmigung besteht, dürfen auch weiterhin abgetorft werden. Der jeweilige Betreiber wird jedoch dazu verpflichtet, nach der Abtorfung renaturierende Maßnahmen einzuleiten.



Die Maßnahmen zur Renaturierung der entsprechenden Flächen haben zum Ziel, die ursprünglichen Bedingungen wieder herzustellen, damit sich die typische Hochmoorvegetation wieder bilden kann und dadurch eine Regeneration der Flächen herbeigeführt wird. Dazu ist es notwendig, durch Wiedervernässung den ursprünglichen Wasserhaushalt wieder herzustellen. Als erster Schritt werden dazu die stark wasserbrauchenden Pflanzen, wie Birken und Kiefern, entfernt. Dieser Vorgang wird Entkusselung genannt (siehe Abbildung 22). Die Entwässerungsgräben werden geschlossen und es werden eventuell weitere Maßnahmen ergriffen, um ein Anstauen des Wassers zu erreichen. Dies geschieht beispielsweise auch durch das Anlegen von Dämmen. Nach dieser Maßnahme sind die Bedingungen hergestellt, die zu einer Ansiedlung der hochmoortypischen Pflanzen und Tiere führen können.

4.1.6 Das Tote Moor in Niedersachsen

Das Tote Moor liegt am Nordostufer des Steinhuder Meeres ca. 27km nordwestlich von Hannover. Die Fläche betrug ehemals mehr als 30km². Heute gelten noch 23,6km² als Mooregebiet. Nach dem bäuerlichen Handtorfstich begann die industrielle Abtorfung in dem Gebiet schon in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Heutzutage sind weite Teile des Toten Moores entwässert, und der Kernbereich ist geprägt vom industriellen Stich- und Frästorfabbau. Daneben finden sich u.a. als Grünland genutzte Bereiche ebenso wie forstlich genutzte Areale.

4.2 Manuelle Interpretation von Luftbildern

Die Methode, die auch heute noch primär zur Interpretation von Luftbildern verwendet wird, ist die manuelle Interpretation¹. Dabei ist neben der Qualität der genutzten Luftbilder und der verwendeten Auswertegeräte in erster Linie das Fachwissen und die Erfahrung der Auswerter für den Interpretationsprozess von größter Bedeutung. Dies betrifft sowohl die Kenntnis über das Aussehen und die Struktur der zu interpretierenden Flächen als auch das Wissen über die Strategie der Interpretation.

Nach [9] lassen sich die im Luftbild abgebildeten Objekte durch folgende Merkmale identifizieren:

- Absolute Lage
- Relative Lage
- Größe der Objekte
- Schattenwurf
- Form der Objekte
- Farbtönung und Farbsättigung
- Textur
- Assoziation
- Nutzungs- und Bewirtschaftungsspuren

Als Assoziation wird die Tatsache bezeichnet, dass bestimmte Objekte nur in Verbindung oder in der Nähe von anderen Objekten auftreten können.

Die Identifikation kann nach [9]:19 unterteilt werden in die *unbewusste* und in die *bewusste Identifikation*. Bei der *unbewussten Identifikation* sind die entsprechenden Landschaftsobjekte in ihrem Erscheinungsbild aus früheren Identifikationen bekannt. Viele Landschaftsobjekte können durch die Wiedererkennung identifiziert werden.

Die *bewusste Identifikation* ist demgegenüber mit einem größeren Aufwand verbunden. Wenn mit Hilfe der Wiedererkennung keine Identifikation durchgeführt werden kann, muss nach Indikatoren gesucht werden, die auf eine bestimmte Identifikation hindeuten. Diese Indikatoren können sowohl aus schon erkannten Objekten bestehen als auch aus den Merkmalen, die oben angegeben sind.

Die Interpretation von Vegetationsflächen und insbesondere von Biotopen in Luftbildern erfolgt zumeist mit Hilfe der *bewussten Identifikation*. Um eine möglichst objektive und nachvollziehbare Interpretation durchführen zu können, bedient man sich häufig sogenannter Interpretationsschlüssel. Mit Hilfe von Interpretationsschlüsseln werden charakteristische Erkennungsmerkmale für die unterschiedlichen Klassen, in welche die Luftbildobjekte einzuordnen sind, festgelegt.

¹ Unter Interpretation von Luftbildern soll hier das Erkennen und Identifizieren von im Luftbild dargestellten Objekten verstanden werden.

Es wird zwischen zwei Kategorien von Interpretationsschlüsseln unterschieden: *Auswahlschlüssel* und *Eliminationsschlüssel*. Der *Auswahlschlüssel* stellt zu jeder vorhandenen Klasse mehrere Bildbeispiele zur Verfügung. Durch einen Vergleich dieser Referenzbilder mit den entsprechenden zu interpretierenden Flächen im Luftbild kann die jeweils am besten passende Klasse ausgewählt werden. Die jeweils charakteristischen Merkmale müssen somit vom Auswerter aus den Referenzbildern erkannt und verglichen werden. Demgegenüber werden durch *Eliminationsschlüssel* systematisch Objektmerkmale vorgegeben, nach denen für die Interpretation zu suchen ist. Dabei wird von groben Klassen ausgegangen und stufenweise immer weiter verfeinert, wobei in jeder Stufe die Merkmale angegeben sind, durch die die Differenzierung in die nächste Stufe durchgeführt werden kann. Häufig werden beide Schlüssel kombiniert, um so die Sicherheit der Interpretation zu erhöhen.

Die erstellten Interpretationsschlüssel sind in der Regel nicht universell anwendbar. Vielmehr sind sie abhängig von folgenden Faktoren:

- *Standort*: In Abhängigkeit davon können Flächen mit gleicher Klassenzuordnung eine unterschiedliche Ausprägung haben. Dies kann von den geologischen Bedingungen und den umliegenden Vegetationsarten abhängen.
- *Bildmaßstab*: Er bestimmt die Merkmale, die zur Interpretation herangezogen werden können und die mögliche Differenzierungstiefe.
- *Aufnahmezeitpunkt*: In Abhängigkeit von der Jahreszeit werden Landschaftsflächen meist eine unterschiedliche Ausprägung aufweisen, insbesondere Vegetationsflächen.
- *Verwendeter Film*: Die Wahl der Art des Filmes (RGB- oder CIR(Color-Infrarot)-Farbfilm) hat entscheidenden Einfluss auf die farbliche Ausprägung der Objekte. Zudem können Filme der gleichen Art mit unterschiedlichen Emulsionen Abweichungen in der farblichen Ausprägung, in der Helligkeit und im Kontrast aufweisen.

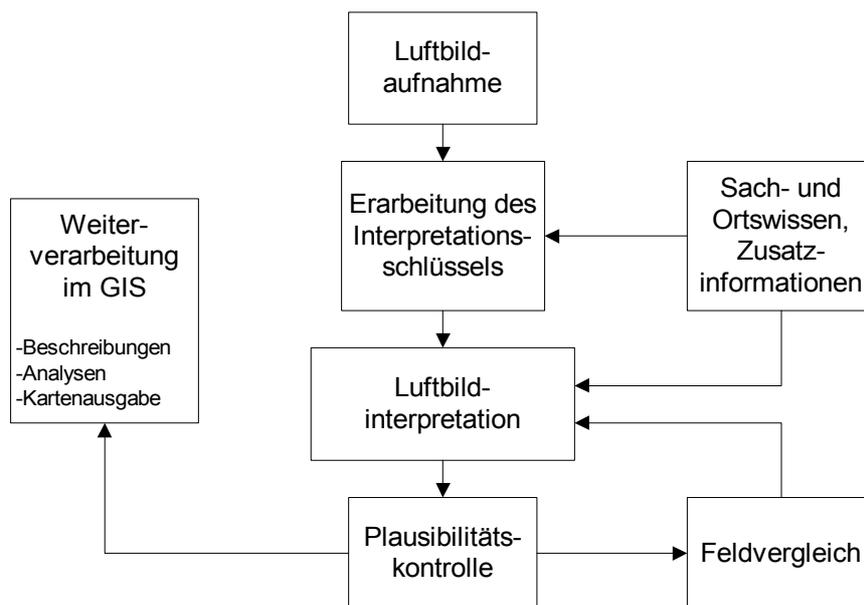


Abbildung 23: Ablauf einer Biotoptypenkartierung nach [1]

In Abbildung 23 ist der Ablauf einer Biotoptypenkartierung dargestellt, die in die Kategorie *bewusste Identifikation* einzuordnen ist. Nach der Aufnahme der Luftbilder erfolgt die Erarbeitung der Interpretationsschlüssel. Dabei werden vorhandene Interpretationsschlüssel an die Faktoren des jeweiligen Bildfluges angepasst oder sie werden neu erstellt. Daraufhin folgt die Luftbildinterpretation. Eine Plausibilitätskontrolle entscheidet darüber, ob für bestimmte Interpretationen mit Hilfe eines Feldvergleiches Zusatzinformationen gesammelt werden müssen. Mit Hilfe dieser Zusatzinformationen kann die Interpretation daraufhin mit einer größeren Sicherheit durchgeführt bzw. verbessert werden.

Üblicherweise werden für Vegetations- und Biotoptypenkartierungen CIR-Filme verwendet. Der CIR-Film reagiert auf die Spektralbereiche rot, grün und nahes Infrarot. Genau in diesem Bereich weist die Vegetation ein umfangreiches Reflexionsvermögen auf. Daher ist eine bessere Farb- und Helligkeitsdifferenzierung der Vegetation möglich als bei RGB-Farbfilmen. Die Wahl des Bildflugmaßstabes hängt von der Zielsetzung der jeweiligen Interpretation ab. Häufig wird für Vegetations- und Biotoptypenkartierungen ein Maßstab von 1:10.000 verwendet (z.B. [9]).

Alle oben beschriebenen Merkmale, die zur Identifizierung der Luftbildobjekte herangezogen werden, sind in der in Kapitel 3 beschriebenen Strategie enthalten und wurden verwendet, um die in diesem Kapitel weiter unten beschriebene automatische Interpretation von industriell genutzten Mooregebieten durchzuführen. Die Vorgehensweise ähnelt der in Abbildung 23 beschriebenen. Die Erarbeitung der Interpretationsschlüssel entspricht dem Aufbau der unten dargestellten Konzeptnetze, die für die Interpretation verwendet werden. Die Interpretation selbst mit der Plausibilitätskontrolle wird automatisch durch das System durchgeführt.

4.3 Automatische Interpretation von industriell genutzten Mooregebieten

Als Grundlage für die automatische Interpretation erfolgt zunächst in Abschnitt 4.3.1 eine Herleitung der unterschiedenen Moorklassen. Daraufhin werden in Abschnitt 4.3.2 die verwendeten Modelle für die Interpretation von Mooregebieten beschrieben und in Abschnitt 4.3.3 auf die multitemporale Interpretation ausgeweitet. Die verwendeten Daten und die Ergebnisse werden schließlich in den Abschnitten 4.3.4 und 4.3.5 dargestellt und in Abschnitt 4.3.6 bewertet.

4.3.1 Moorklassen

Zur Erstellung einer sinnvollen Gruppe von Moorklassen wird in Abschnitt 4.3.1.1 dargestellt, welche Moorklassen in CIR-Luftbildern unterscheidbar sind und daraus in Abschnitt 4.3.1.2 eine Definition von Moorklassen für den konkreten Anwendungsfall durchgeführt.

4.3.1.1 Unterscheidbare Moorklassen

Um eine Interpretation des Mooregebietes durchführen zu können, ist eine Unterteilung des Gebietes in unterschiedliche Klassen notwendig. In [68] ist untersucht worden, welche Klassen sich im Mooregebiet aus CIR-Luftbildern unterscheiden lassen. Das Ziel dieser Untersuchung war die Bildung von Moorklassen für die automatische Interpretation der Mooregebiete. Um abschätzen zu können, wie viele und welche Moorklassen automatisch von einem wissensbasierten System unterschieden werden können, wurde davon ausgegangen, dass die obere Grenze durch die Anzahl der Klassen abgeschätzt werden kann, die ein erfahrener Auswerter interaktiv unterscheiden kann. Diese Aussage beruht auf der Annahme, dass der Mensch in der Lage ist, mindestens so viele Klassen zu unterscheiden, wie ein automatisches Interpretationssystem. Diese Annahme gilt unter der Voraussetzung, dass die Maschine nur so viel Informationen verwendet, wie der Mensch parallel aufnehmen und nutzen kann. Wenn beispielsweise hyperspektrale Bilddaten vorliegen, die der Mensch nicht gleichzeitig verarbeiten kann, wird die Maschine in der Regel mehr Klassen unterscheiden können. Der Vorteil der Interpretationsfähigkeit des Menschen liegt neben der Verwendung von Zusatzinformationen und Erkennung von Strukturen insbesondere in der Interpretation von Texturen, die bei den heutigen Systemen noch wenig leistungsfähig ist.

Als Testgebiet ist das Tote Moor verwendet worden. Die Eingangsdaten waren CIR-Luftbilder im Maßstab 1:10.000. Die Aufgabe bestand darin, festzustellen, welche Klassen visuell aus den verwendeten Bildern durch einen Auswerter unterschieden werden können. Die Unterschiede konnten dabei sowohl in der Radiometrie liegen als auch in der Textur.

In Abbildung 24 ist das Ergebnis der Untersuchung dargestellt. Es wurde damit begonnen, alle visuell unterscheidbaren Regionen in Klassen einzuteilen. Das Ergebnis dieses Vorganges waren 14 Moorklassen, die gleichzeitig die feinste Unterscheidung bilden. Daraufhin wurden sehr ähnliche Klassen zu größeren Klassen akkumuliert. Letzteres wurde mehrmals durchgeführt. Dargestellt sind die größte und feinste Verfeinerungsstufe.

Wie sich aus der Abbildung zeigt, ist die Trennung zwischen einem Regenerationsgebiet und einem Degenerationsgebiet auch in der feinsten Verfeinerungsstufe sehr schwierig, was zu einer Zusammenfassung dieser Klassen führte. Eine Trennung kann aufgrund der beobachtbaren Merkmale nur sehr schwer durchgeführt werden, da in den Begriffen auch die Richtung der zeitlichen Veränderung steckt. Für die Interpretation von derartigen Klassen ist somit temporales Wissen erforderlich.

Die hier vorgenommene Klasseneinteilung bildet die Grundlage für die Klasseneinteilung des im nächsten Abschnitt dargestellten Interpretationssystems. Da sich die Klassen der Verfeinerungsstufe 1 relativ stark voneinander unterscheiden, sollte deren Unterscheidung als Minimalziel für das automatische Interpretationssystem gelten. Das optimale Ziel ist die Unterscheidung nach der Verfeinerungsstufe 2. Daher ist als Basis die Einteilung nach der Verfeinerungsstufe 2 verwendet worden. Aus der Klasse *landwirtschaftlich genutzte Fläche* wurde einzig *Grünland* verwendet, da weitergehende Untersuchungen hierzu nicht durchgeführt worden sind. Genauso verhält es sich mit der Klasse *Wald*, die als eine einzige Klasse ohne weitere Unterteilung verwendet wird. Die Verfeinerung dieser Klassen ist vor dem Hintergrund der Zielsetzung, Moorklassen zu unterscheiden, von geringerer Bedeutung.

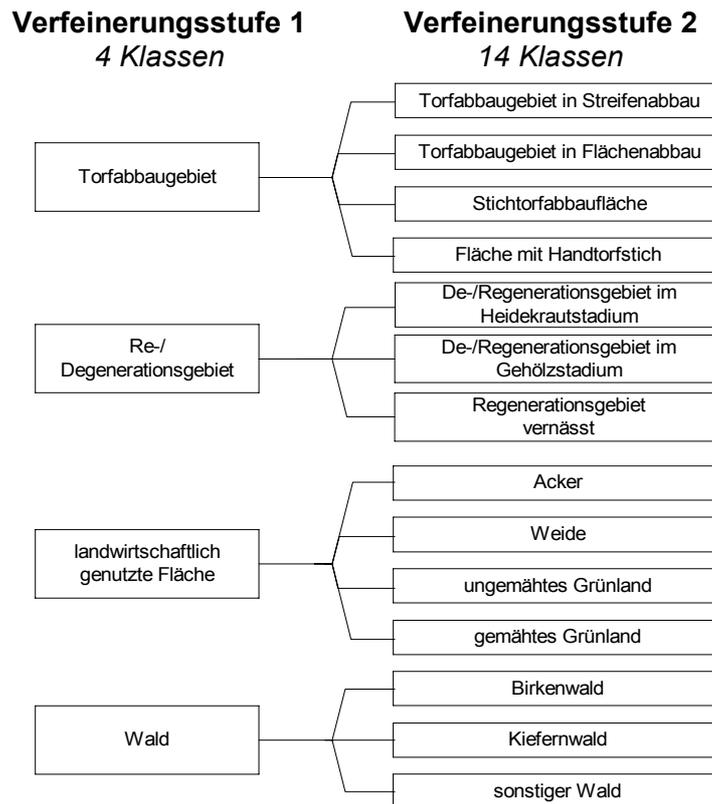


Abbildung 24: Unterscheidbare Objektklassen im Moor

4.3.1.2 Bildung von Moorklassen

Aus der Untersuchung im vorhergehenden Abschnitt wird eine Klasseneinteilung im Zusammenhang mit einer Klassendefinition abgeleitet. Die Klassendefinition ist vor dem Hintergrund von Bedeutung, dass es unter den unterschiedlichen Disziplinen, die sich mit Mooregebieten und der Vegetation in ihnen beschäftigen, unterschiedliche und uneinheitliche Begriffsdefinitionen für mehrere Klassen gibt, insbesondere für die Klassen Degenerations- und Regenerationsgebiet.

Folgende Klassen werden für die automatische Interpretation unterschieden:

Grünland

Gebiete, auf denen sich Wiesen und Weiden befinden. Sie sind in der Regel dicht mit Vegetation bedeckt. Eine Abgrenzung zu Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium kann schwierig sein.

Wald

Besteht zum größten Teil aus Gehölzen, die dicht beieinander stehen. Eine Abgrenzung zu Degenerationsgebiet und Regenerationsgebiet im Gehölzstadium kann unscharf sein.

Torfabbaugebiet in Flächenabbau

Gebiet mit flächenhaftem Abbau von Frästorf. Da die Klasse Stichtorfabbaufläche aufgrund der betrachteten Auflösung der Bilder nicht getrennt modelliert wurde, jedoch im betrachteten Auflösungsbereich ähnliche Strukturen aufweist wie das Torfabbaugebiet in Flächenabbau, werden Stichtorfabbauflächen meist dieser Klasse zugewiesen.

Torfabbaugebiet in Streifenabbau

Gebiet mit streifenweisem Abbau von Frästorf. Dieser Abbau tritt abwechselnd mit Streifen von Bunkerde auf. Die Kombination aus Bunkerde und Frästorfabbausegment ergibt diese Klasse.

Inaktives Torfabbaugebiet

Gebiet mit sehr wenig bis keiner Vegetation, auf dem vormals Torfabbau betrieben wurde, auf dem jedoch die wichtigen charakteristischen parallelen Linien fehlen.

Degenerationsgebiet

Gebiet, das sich durch vom Menschen herbeigeführte Entwässerungsmaßnahmen zum Zwecke des Torfabbaus in der Entwicklung weg vom ursprünglichen Hochmoor bewegt. Dies ist dann der Fall, wenn der Grundwasserspiegel relativ niedrig und das Gebiet daher trocken ist. Als Stadium stärkster Degeneration wird der Torfabbau betrachtet. Daher wird eine Wiederansiedlung von Pflanzen, auch von Sträuchern, nicht als Degeneration sondern als Regeneration bezeichnet. Da diese Klasse den Zustand vor dem Torfabbau wiedergibt, können die als Degenerationsgebiet eingestuft Klassen in Wirklichkeit auch Regenerationsgebiete sein, falls aus den verfügbaren Beobachtungen nicht ausgeschlossen werden kann, dass in dem Gebiet vorher Torfabbau stattgefunden hat.

Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium

Gebiet, das sich in Richtung ursprüngliches Hochmoor entwickelt, auf dem Heidekraut wächst und auf dem bereits Torfabbau betrieben wurde. Der Grundwasserspiegel ist hoch genug, damit sich keine oder nur wenig Bäume ansiedeln können oder diese absterben. Dieser Zustand kann auch nach Entkesselungsmaßnahmen (siehe Abschnitt 4.1.5) erreicht werden.

Regenerationsgebiet im Gehölzstadium

Gebiet, auf dem nach Torfabbau Gehölz wächst. Die Voraussetzung hierfür ist ein trockenes Gebiet (niedriger Grundwasserspiegel). Die Abgrenzung zur Klasse Wald kann fließend sein, je nach Dichte des Gehölzes. Die Sichtbarkeit von Einzelbäumen soll hier Voraussetzung für diese Klasse sein und eine Abgrenzung zur Klasse Wald bilden.

Vernässtes Gebiet

Gebiet mit niedriger Vegetation, auf dem eine Vernässung eingetreten ist. Charakterisiert durch größere, offene Wasserflächen.

4.3.2 *Monotemporale Interpretation*

4.3.2.1 *Aufbau der Wissensbasis*

In Abbildung 25 ist das Konzeptnetz, das zur Interpretation der Moorklassen verwendet wurde, dargestellt. Es werden zwei Abstraktionsebenen unterschieden: Szenenebene und Luftbildebene. In der Szenenebene werden die unterschiedlichen Klassen mit ihren obligatorischen Teilen beschrieben. Die Knoten in der Luftbildebene beschreiben die Abbildung der Szenenknoten und deren Eigenschaften im CIR-Luftbild. Sie repräsentieren die Texturen und Farben, nach denen gesucht werden muss, um ein Segment einer bestimmten Klasse zuzuordnen. Auf diese Weise werden sowohl Farb- als auch Texturinformationen genutzt.

Die Knoten auf unterster Ebene haben jeweils Zugriff auf spezielle Bildverarbeitungsoperatoren. Diese verifizieren die Hypothesen in den CIR-Luftbildern auf Pixelebene. Im Verlauf der Interpretation wird im Schritt nach dem Aufstellen der Hypothesen auf unterster Ebene jeweils der spezielle Operator aufgerufen.

Im Konzeptnetz besteht das *Moorgebiet* aus *Moorsegmenten*. Diese können eine der vier Moorklassen sein: *Grünland*, *Wald*, *De-/Regenerationsgebiet* und *Torfabbaugebiet*. Die unterschiedenen Moorklassen wurden aus der in Abschnitt 4.3.1.1 beschriebenen Untersuchung abgeleitet. Dabei wurde berücksichtigt, welche Klassen im Untersuchungsgebiet überhaupt vorhanden sind und welche Trennung der Klassen vor dem Hintergrund der verwendeten Auflösung möglich ist. Aus der Gruppe der *landwirtschaftlich genutzten Flächen* wurde das *Grünland* verwendet, da der Rest im Untersuchungsgebiet nur unwesentlich vertreten ist. Die Klasse *Wald* wurde nicht weiter unterteilt, da sich zum einen der betrachtete Auflösungsbereich (0.5m/Pixel) dazu nicht eignet ([46]:240 [3]:165ff.) und zum anderen der Schwerpunkt auf die Unterscheidung unterschiedlicher Moorklassen gelegt wurde. Die Klassen *Degenerations-* und *Regenerationsgebiet* sind zusammengefasst worden, da ihre Unterscheidung aus Luftbildern eines Zeitpunktes sehr schwierig ist (siehe Abschnitt 4.3.1.1).

Für *Grünland* wurde ebenso wie für *Wald* als obligatorischer Teil eine *hohe Vegetationsdichte* vorausgesetzt. Diese äußert sich im CIR-Luftbild als ein Gebiet mit *hohem NDVI-Anteil*, womit gemeint ist, dass der Anteil der Fläche mit positivem Wert des NDVI hoch ist.

Der Unterschied zwischen diesen beiden Moorklassen ergibt sich dadurch, dass das *Grünland* durch die *dichte Bedeckung mit feiner Struktur* (Gräser) über eine *hohe Homogenität* verfügt, während für *Wald* obligatorisch eine durch die *dichte Bedeckung mit grober Struktur* (Bäume) *niedrige Homogenität* und eine *stark unregelmäßige Struktur* vorgegeben ist.

Das *De-/Regenerationsgebiet* setzt sich aus den Teilen *mittlere bis hohe Vegetationsdichte* und *mittlere Bedeckung mit grober Struktur* zusammen, was sich im CIR-Luftbild als *mittlerer bis hoher NDVI-Anteil* und *unregelmäßige Struktur* darstellt.

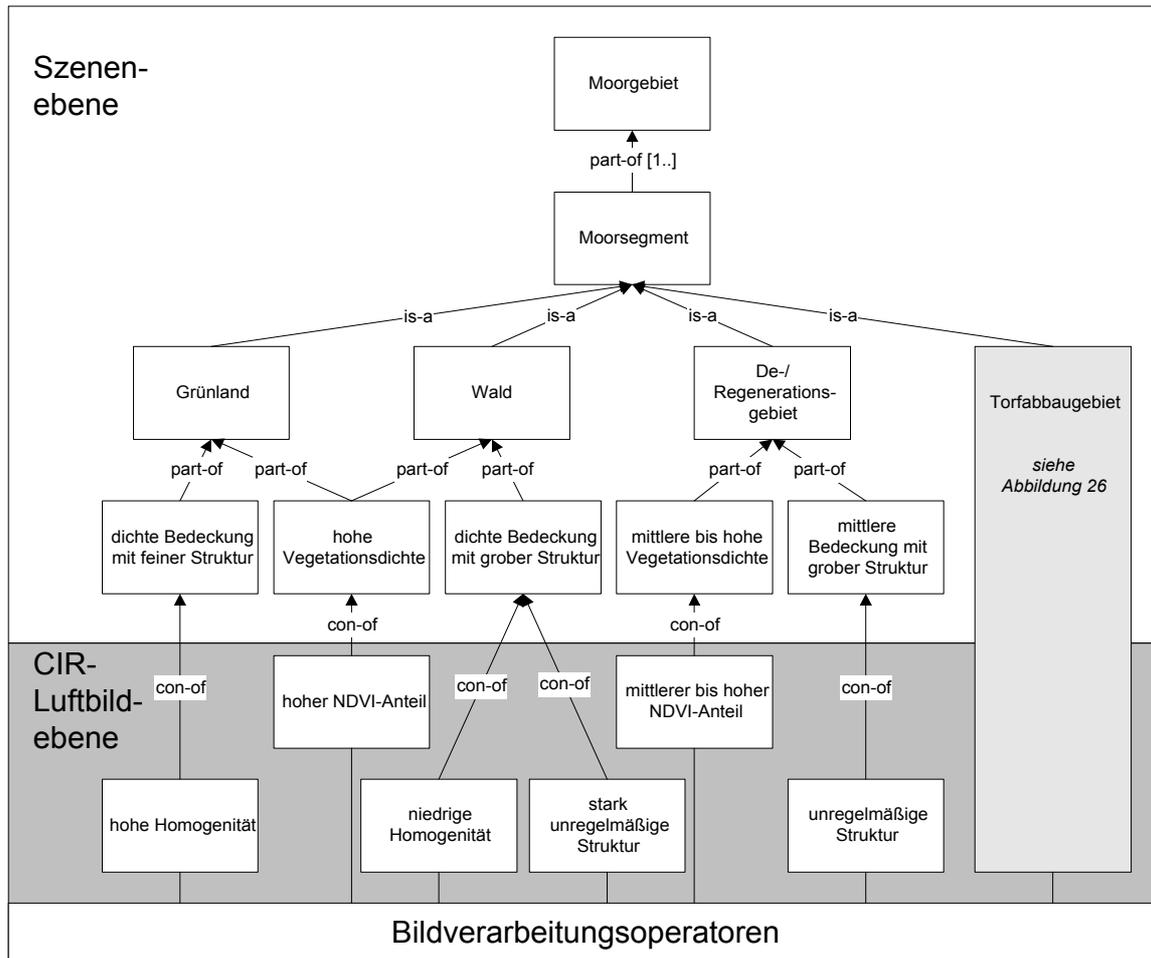


Abbildung 25: Konzeptnetz zur Moorinterpretation

Die Moorklasse *Torfabbaugebiet* ist in Abbildung 26 dargestellt. Sie wird weiter unterteilt in die Teilklassen *Torfabbaugebiet in Streifenabbau* und *in Flächenabbau*. Das Gebiet im *Flächenabbau* wird durch zwei Teile charakterisiert: Zum einen durch *Frässpuren*, die sich im Luftbild als *viele parallele Linien* wiederfinden lassen. Zum zweiten wächst im derartigen Gebiet keine oder sehr wenig Vegetation. Daher wird eine *niedrige Vegetationsdichte* vorgegeben.

Das *Torfabbaugebiet in Streifenabbau* setzt sich aus sich abwechselnden Streifen mit *Bunkerde* und *Abbausegment* zusammen. Die *Bunkerde* weist zum einen eine *hohe Vegetationsdichte* auf, zum anderen ein *streifenförmiges Segment*. Der letzte Punkt wird dadurch verifiziert, dass nach einer *Kontur mit mindestens einem Paar paralleler Kanten* gesucht wird. Diese Bedingung muss auch für das *Abbausegment* gelten. Es besitzt ansonsten die gleichen Eigenschaften wie das *Torfabbaugebiet in Flächenabbau*. Zur erfolgreichen Interpretation eines Gebietes als *Torfabbaugebiet in Streifenabbau* muss von beiden Teilsegmenten jeweils mindestens eines gefunden werden. Die Teilsegmente müssen zusätzlich eine direkte Nachbarschaft zueinander aufweisen.

Trifft für eine zu untersuchende Klasse keine der Klassenbeschreibungen zu, so ist als Ausweichklasse das *De-/Regenerationsgebiet* vorgegeben. Die Begründung liegt darin, dass diese Klasse in noch mehr Varianten als hier modelliert vorkommen kann. Daher kann auf diese Weise über das Ausschlussprinzip eine Interpretation erfolgen. Weiterhin bildet diese Klasse üblicherweise den Ausgangszustand für die Zustandsveränderungen (siehe Abschnitt 4.3.3.2) und kommt zudem am häufigsten in den Niedersächsischen Hochmooren vor ([55]:41).

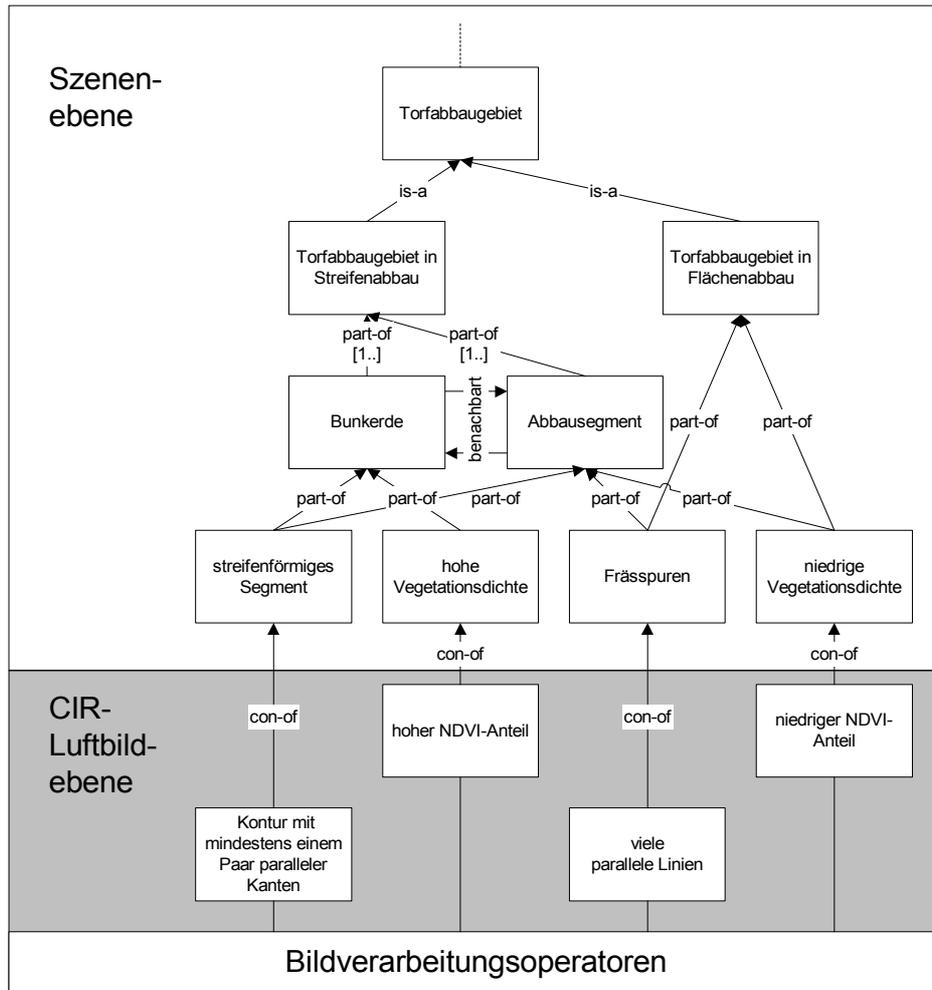


Abbildung 26: Konzeptnetz zur Interpretation von Torfabbaugebieten

4.3.2.2 Wissensbasis für Schwarzweißbilder

Betrachtet man alle Klassen, die hier ohne multitemporale Informationen, jedoch unter Ausnutzung von Farbbildern, unterschieden worden sind, so zählt man insgesamt sechs (das Torfabbaugebiet wurde mit drei Klassen gezählt). Befliegungen werden jedoch nicht immer in Farbe durchgeführt. Wenn nicht speziell für eine Vegetations-Interpretation geflogen wird, reichen für viele andere Anwendungen Schwarzweißbilder vollkommen aus. Sollen Schwarzweißbilder für die hier betrachtete Interpretation genutzt werden, ist eine Modifikation der Wissensbasis notwendig.

Statt der sechs Klassen bei Verwendung von Farbbildern können hier nur vier Klassen unterschieden werden. Die modifizierte Wissensbasis ist in Abbildung 27 dargestellt. Im Konzeptnetz für CIR-Luftbilder befinden sich in der ersten Zeile der CIR-Luftbildebene die die Farb-Merkmale repräsentierenden Knoten. Im Konzeptnetz für Schwarzweißbilder existieren diese Knoten nicht mehr.

Im Konzeptnetz ist nur noch eine Torfabbaugebiets-Klasse repräsentiert. Das *Torfabbaugebiet in Streifenabbau* wird nicht unterschieden, da aufgrund fehlender NDVI-Informationen die *Bunkerde* nur schwer gegenüber dem *Abbausegment* abgegrenzt werden kann. Insgesamt ist durch den Wegfall der Farbinformationen auch die Möglichkeit zur Fehlinterpretation des *Torfabbaugebietes* gestiegen. Die Verwechslungsgefahr mit der Klasse *De-/Regenerationsgebiet* ist gewachsen. Aus diesem Grunde ist zusätzlich in die Wissensbasis ein Knoten hinzugefügt worden, der eine Verifikation auf *wenig unregelmäßige Struktur* vornimmt. Damit soll die Verwechslungsgefahr verringert werden. Nach den durchgeführten Experimenten ist bei Vorhandensein von Farbinformationen diese Bedingung nicht notwendig. Sie würde im Gegenteil, zu einer Verschlechterung des Ergebnisses führen, da bei einer hohen Dichte der Frässpuren auch der Merkmalsanalyseoperator für eine *unregelmäßige Struktur* positiv reagieren würde.

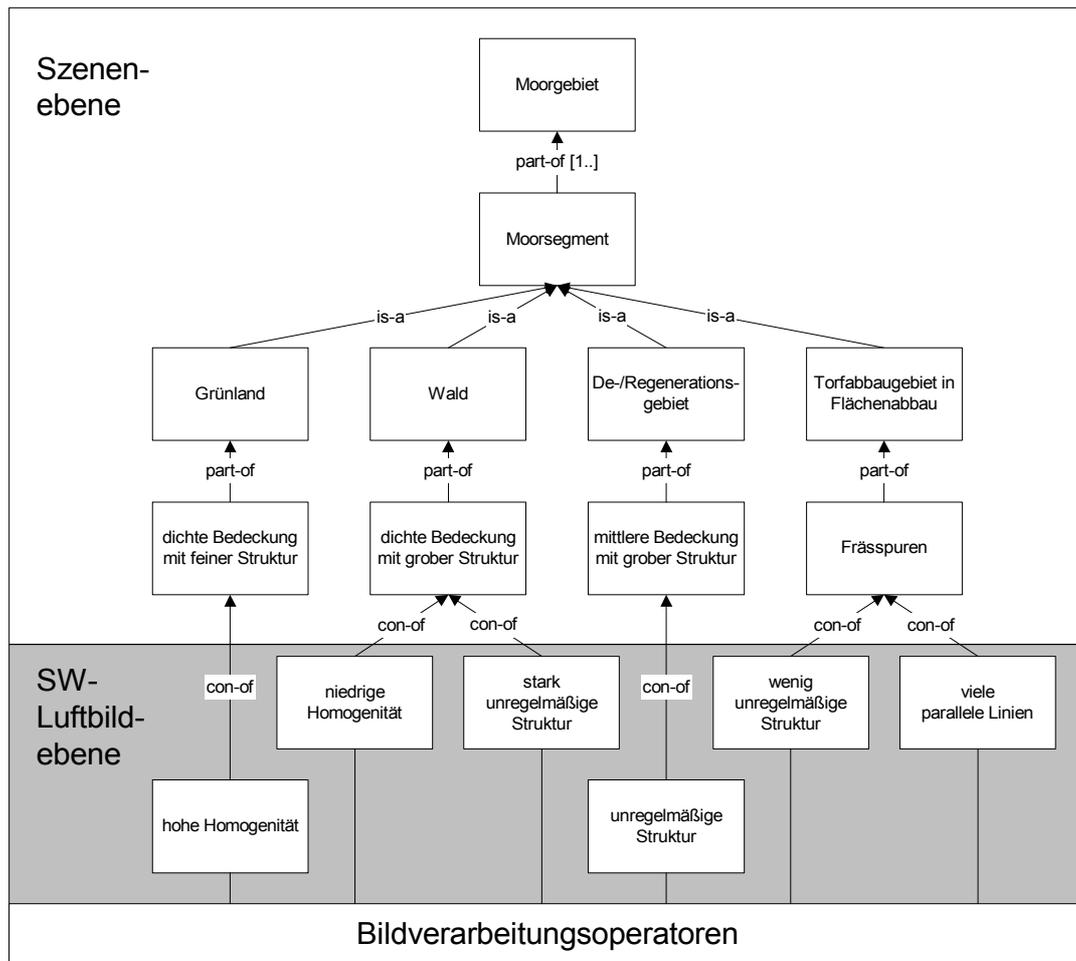


Abbildung 27: Wissensbasis für die Interpretation von Schwarzweißbildern

4.3.2.3 Spezielle Merkmalsanalyseoperatoren

Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Merkmalsanalyseoperatoren, die grundsätzlich auch für andere Aufgabenstellungen einsetzbar sind, werden nachfolgend noch zwei spezielle beschrieben, die primär im Kontext der Moorinterpretation funktionieren: Ein Merkmalsanalyseoperator zur Detektion von Baumschatten und einer zur Detektion von Wasserflächen. Diese sollen kurz erläutert werden.

Die Detektion von Baum- bzw. Gehölzschatten ist von Bedeutung, wenn ein *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium* erkannt werden soll. Da Bäume ohne 3D-Informationen nicht direkt erkannt werden können, soll dies indirekt über die Schatten geschehen.

Das Problem der Erkennung über die Schatten besteht darin, dass, obwohl sie charakteristische radiometrische Eigenschaften aufweisen, mehrere andere Regionen im betrachteten Gebiet der Moore über ähnliche oder gleiche Eigenschaften verfügen. Daher werden bei einer radiometrischen Selektion der Schatten auch andere Regionen mitselektiert. Dies trifft beispielsweise auf Flächen im *Torfabbaugebiet* zu, die dunklen und/oder feuchten Torf enthalten. Auch eine Verwechslung mit Seen oder größeren Lachen ist möglich.

Weiteres Vorwissen über die Baumschatten ist die direkte Nachbarschaft zu den Bäumen selbst. Zudem lassen sich für die Schatten maximale Größen angeben. Die Detektion wurde basierend auf dieses Vorwissen konzipiert und läuft in folgenden Schritten ab:

1. Extraktion der Schattenregionen: In der jeweils betrachteten Region wird im Grauwertbild jener dunkle Anteil extrahiert, in dem sowohl Schatten als auch die oben erwähnten störenden Regionen enthalten sind.
2. Aus diesen Regionen werden diejenigen, die eine bestimmte Größe überschreiten, eliminiert. Sie können aufgrund des Vorwissens keine Schatten sein.
3. Selektion der Regionen, die eine direkte Nachbarschaft zu Bäumen aufweisen. Hier wird das Vorwissen genutzt, dass Bäume über Biomasse verfügen und sich diese im NDVI zeigt. Aus diesem Grunde werden alle Regionen mit einem positiven Wert für den NDVI extrahiert. Von Interesse sind die Schattenregionen, welche

eine direkte Nachbarschaft zu denjenigen Vegetationsflächen aufweisen, die in der Regel Baumregionen sind. Daher werden die bereits extrahierten Schattenregionen um einige Pixel vergrößert (Anzahl etwa in der Größe eines durchschnittlichen Baumkronendurchmessers). Die beiden so gewonnenen Bilder werden nun überlagert. Die Schnittmenge aus beiden gibt ein Maß für das Vorhandensein einzelner Bäume. Sie wird mit morphologischen Operatoren nachbearbeitet.

In Abbildung 28 sind Ausgangs- und Ergebnisbild dargestellt. Diese Art der Erkennung ist nur mit CIR-Farbbildern sinnvoll, nicht mit schwarzweißen, da aufgrund der fehlenden NDVI-Informationen falsche Regionen extrahiert werden würden. Zudem funktioniert das Verfahren nur für Jahreszeiten, in denen die Bäume belaubt sind. Weiterhin können dicht aneinander stehende Bäume auf diese Art und Weise nicht in die Detektion einfließen, da ihre Schatten nicht erkennbar sind. Jedoch soll dieser Operator primär einzelne Bäume detektieren, weshalb diese Einschränkung nicht relevant ist. Zur fehlerhaften Detektion kann es auch kommen, wenn eine kleine Pfütze direkt neben Vegetation, wie Rasen, auftritt. Dies geschieht jedoch nicht häufig, so dass das Ergebnis dadurch nicht oder nur im geringen Maße verfälscht wird.

$$\text{einzelne Baumschatten} = \frac{A_{\text{Schatten neben Vegetation}}}{A_{\text{ges}}} \cdot K_{\text{Baumschatten}}$$

$A_{\text{Schatten neben Vegetation}}$: Fläche der Schnittmenge, wie oben beschrieben

A_{ges} : Gesamtfläche

$K_{\text{Baumschatten}}$: Konstante, die durch manuelle Kalibrierung festgelegt wird

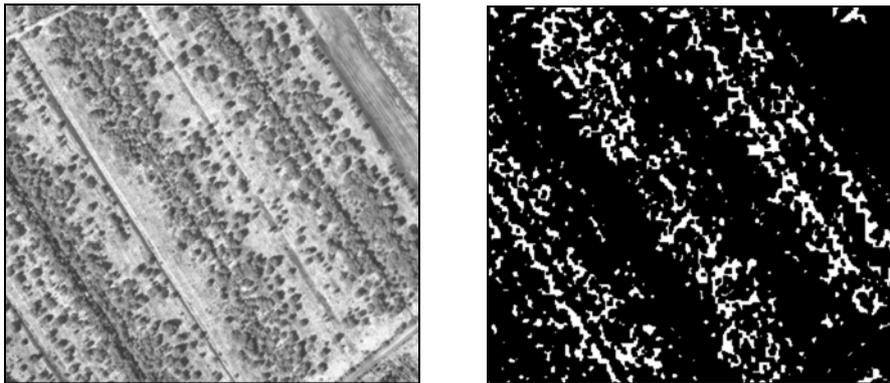


Abbildung 28: Ausschnitt mit Baumschatten (links), Selektierte Bäume (weiß) mit Schatten (rechts)

Zur Detektion von Wasserflächen wird als Vorwissen der Ort und die Form von vorhandenem Gewässer verwendet. Dies kann aus den GIS-Daten oder aus der TK50 gewonnen werden. Diese Vorinformation kann daraufhin, wie in Abschnitt 3.2.2.6 dargestellt, dazu verwendet werden, die Radiometrie der Objektart anzulernen. Dies wird benutzt, um weitere Wasserflächen aus dem Bild zu extrahieren. Über Formparameter werden nur Regionen, die in Größe und Kompaktheit einen bestimmten Grenzwert überschreiten, verwendet.

4.3.3 Multitemporale Interpretation

4.3.3.1 Strategie der multitemporalen Interpretation

In Abbildung 29 ist der Ablauf der multitemporalen Interpretation dargestellt. Beginnend beim Startpunkt wird eine Initialsegmentierung durchgeführt. Dabei werden sowohl die Bilder des ersten Zeitpunktes t_1 als auch Geo-Daten berücksichtigt. Die Initialsegmentierung ist in Abschnitt 4.3.3.4 näher erläutert. Das Ergebnis der Initialsegmentierung sind Segmentgrenzen, die Ausgangspunkt der weiteren iterativen Interpretation sind.

Innerhalb der Segmentgrenzen wird für jedes Segment eine Interpretation durchgeführt, wobei für den ersten Zeitpunkt die Wissensbasis der monotemporalen Interpretation (Abschnitt 4.3.2.1) verwendet wird. Der Grund hierfür liegt darin, dass temporale Historie für den ersten Zeitpunkt nicht existiert. Das Ergebnis für den ersten Zeitpunkt ist eine Szenenbeschreibung, die die Interpretation der untersuchten Segmente darstellt. Es wird für die Fortführung der Interpretation für den Zeitpunkt t_{i+1} genutzt, um eine Prädiktion der Zustandsübergänge und damit eine Prädiktion neuer Zustände durchzuführen. Hierzu wird ein Zustandsübergangdiagramm, welches das temporale Wissen über die möglichen Zustandsübergänge beschreibt, verwendet. Dieses wird in Abschnitt 4.3.3.2 näher erläutert.

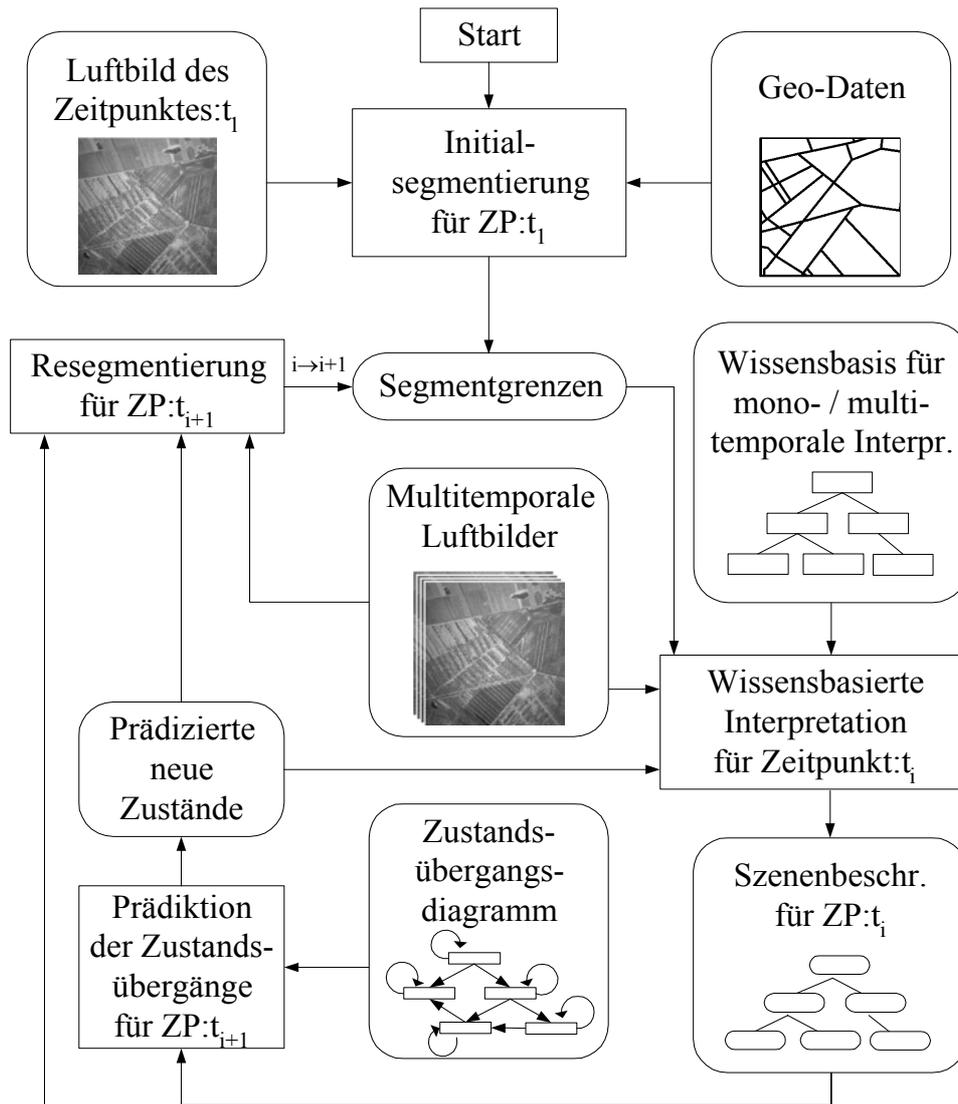


Abbildung 29: Strategie der multitemporalen Interpretation

Beim Übergang vom Zeitpunkt t_i nach t_{i+1} können sich die Segmentgrenzen verändern. Dies geschieht beispielsweise dann, wenn in einem *Degenerationsgebiet* nur ein Teil der Fläche dem *Torfabbau* dient. Aus diesem Grund ist im System eine Komponente enthalten, die eine sogenannte Resegmentierung basierend auf den alten Segmentgrenzen durchführt. Hierzu werden zusätzlich die Bilddaten des Zeitpunktes t_{i+1} zusammen mit den Informationen über die möglichen Zustandsübergänge verwendet. Die Resegmentierung wird in Abschnitt 4.3.3.5 erläutert. Aus der Resegmentierung entstehen die neuen Segmentgrenzen, in denen für den neuen Zeitpunkt t_{i+1} unter Verwendung der Wissensbasis für die multitemporale Interpretation und der möglichen Zustandsübergänge die wissensbasierte Interpretation durchgeführt wird. Kann hierbei ein Segment nicht interpretiert werden, so wird der Zustand unverändert gelassen, da dies den wahrscheinlichsten Fall darstellt. Auf diese Weise wird die Iteration fortgesetzt, bis alle Zeitpunkte interpretiert worden sind. Die verwendete Strategie baut auf der in Abschnitt 3.5.2.1 beschriebenen Strategie der sequenziellen Interpretation auf.

4.3.3.2 Aufbau der temporalen Wissensbasis

Das Zustandsübergangsdiagramm zur Interpretation des untersuchten Mooregebietes ist in Abbildung 30 dargestellt. Da an dieser Stelle Veränderungen von einer Klasse zur anderen beschrieben werden, und ein Gebiet damit seine Klassenzugehörigkeit von einem Zeitpunkt zu einem anderen ändern kann, wird zur Verdeutlichung des dynamischen Charakters in dieser Beschreibung statt Klasse die Bezeichnung Zustand verwendet.

Ausgegangen wird von dem Zustand *naturnahes Hochmoor*. Dieser Zustand kommt im betrachteten Gebiet, ebenso wie in vielen anderen Mooregebieten in Deutschland, nur in geringem Maße vor, da Flächen mit *naturnahem Hochmoor* in den meisten Fällen schon zum Torfabbau oder landwirtschaftlich genutzt werden. Trotzdem ist dieser Zustand der Vollständigkeit halber aufgeführt. Zustandsübergänge finden zur *landwirtschaftlich genutzten Fläche* und zum *Degenerationsgebiet* statt.

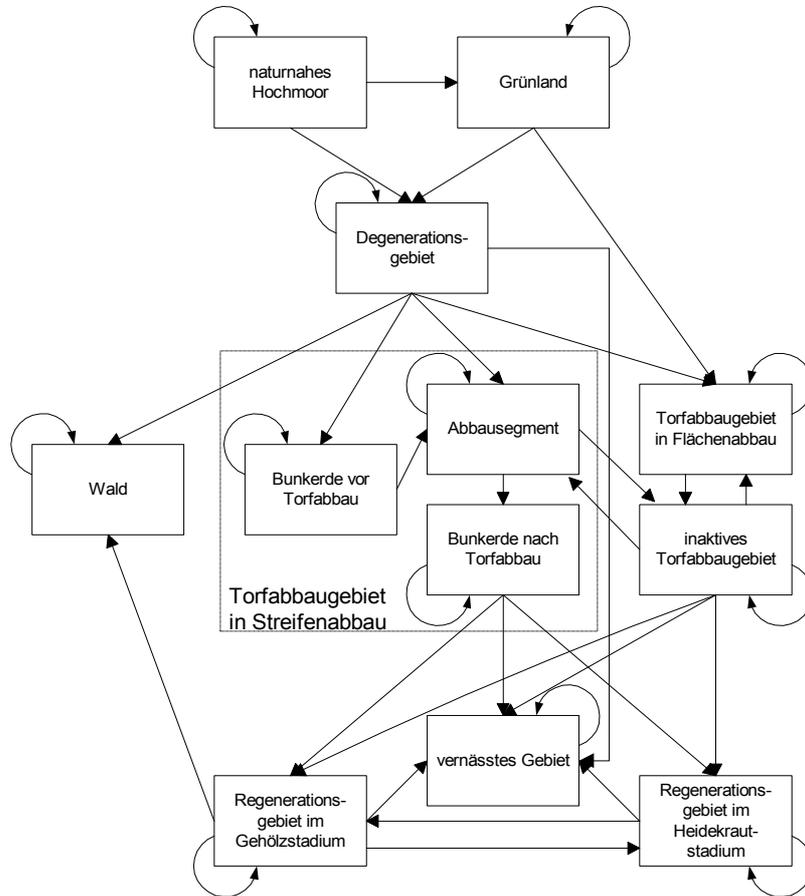


Abbildung 30: Zustandsübergangsdiagramm zur Interpretation von Mooregebieten

Das *Degenerationsgebiet* bildet in der Regel den Ausgangszustand der anderen Zustände. Die Klasse *De-/Regenerationsgebiet* in Abbildung 25 und Abbildung 27 wird bei Nutzung dieses Zustandsübergangsdiagramms als *Degenerationsgebiet* verwendet, da keine weiteren Informationen, um welchen der beiden Zustände es sich tatsächlich handelt, verfügbar sind und im Zweifel der zeitlich zuerst auftretende ausgewählt wird. Die Degeneration ist als vorbereitende Maßnahme, bei der durch Gräben eine Entwässerung durchgeführt wird, zum Torfabbau notwendig. Ist dies geschehen, erfolgt in der Regel ein Zustandsübergang zum *Torfabbaugebiet*. Wenn kein Torfabbau auf dem *Degenerationsgebiet* stattfindet, ist auch ein direkter Übergang zum Zustand *Wald* möglich.

Wie bei der monotemporalen Interpretation werden zwei Arten von Torfabbau unterschieden: die *Flächenabbau-* und die *Streifenabbau*methode. Wird beispielsweise die *Flächenabbau*methode angewendet, wird für die Folgezeitpunkte entweder ein Verbleib in dem gleichen aktiven Zustand erwartet, oder es findet ein Übergang zum *inaktiven Torfabbau* statt. Dieses zeigt sich in Bildern dadurch, dass keine oder nur wenig Abbauspuren sichtbar sind, sich jedoch bislang auch keine oder nur wenig Vegetation angesiedelt hat. Es kann aber auch vorkommen, dass nach einer inaktiven Zeit wieder der Torfabbau aufgenommen wird. Dies geschieht beispielsweise, wenn aufgrund der Marktlage kurzfristig der Torfabbau eingestellt wurde.

Wenn *Torfabbau in Streifenmethode* detektiert wurde, müssen die Teile *Abbausegment* und *Bunkerde* getrennt voneinander behandelt werden. Wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, beruht die Methode des Streifenabbaus darauf, dass Torf zunächst auf jedem zweiten Streifen abgebaut wird, während die Mittelstreifen mit der *Bunkerde* nicht angetastet werden. Ist dieser Vorgang beendet, werden die Streifen mit *Bunkerde* auf die Streifen der *Abbausegmente* umgesetzt. Dies geschieht jedoch in der Regel nur einmal. Im Zustandsübergangsdiagramm wird diese Tatsache ausgenutzt, indem zwischen *Bunkerde vor dem Torfabbau* und *nach dem Torfabbau* unterschieden wird. Wird *Bunkerde* auf ein Segment geschüttet, auf dem vorher bereits Torf abgebaut wurde, kann danach mit Hilfe des beschriebenen Vorwissens darauf

verzichtet werden, für die nächsten Zeitpunkte wieder nach *Abbausegmenten* zu suchen. Wird zum ersten Mal *Bunkerde* detektiert, so wird sie vom System zuerst dem Zustand *Bunkerde vor Torfabbau* zugeordnet, da keine temporalen Informationen existieren und daher der zeitlich erste Zustand angenommen wird.

Nach dem Torfabbau existieren drei mögliche Folgezustände: *Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium*, im *Gehölzstadium* und *vernässtes Gebiet*. Der Zustandswechsel in das *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium* findet in der Regel dann statt, wenn das Gebiet weiterhin trocken bleibt. Dann siedeln sich nach und nach Birken oder Kiefern an und es beginnt eine Bewaldung des Gebietes. Im weiteren Verlauf kann daraus ein Wald entstehen.

Werden jedoch nach dem Torfabbau die Entwässerungsmaßnahmen zumindest teilweise rückgängig gemacht (z.B. Schließung der Entwässerungsgräben), wird das Grundwasser einen höheren Stand erreichen, und es ist ein Übergang in den Zustand *Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium* möglich. Ein Übergang vom *Heidekrautstadium* in das *Gehölzstadium* und umgekehrt ist möglich, wenn beispielsweise sogenannte Entkusselungs-Maßnahmen (siehe Abschnitt 4.1.5) durchgeführt werden, oder wenn aufgrund eines zu niedrigen oder absinkenden Grundwassers das *Heidekrautstadium* nicht stabil ist.

Die dritte Möglichkeit, der Übergang in den Zustand *vernässtes Gebiet*, stellt das Ergebnis von weiteren Moorschutzmaßnahmen dar. Die Wiedervernässung ist Grundlage dafür, die degenerierten Gebiete wieder in einen naturnahen Zustand zu bringen. Dies ist eine Maßnahme, die eher langfristig zum Erfolg führen kann.

Ein Vergleich zwischen dem Zustandsübergangdiagramm und den Konzeptnetzen aus Abschnitt 4.3.2.1 ergibt, dass im Zustandsübergangdiagramm mehr Zustände unterschieden werden. Um eine multitemporale Interpretation auf Basis des Zustandsübergangdiagramms durchführen zu können, muss daher das Konzeptnetz modifiziert werden.

Abbildung 31 zeigt den modifizierten Teil des Konzeptnetzes. Die Veränderungen betreffen das *Torfabbaugebiet* und das *De-/Regenerationsgebiet*. Zusätzlich zu den in Abbildung 26 dargestellten Klassen wird hier zusätzlich das *inaktive Torfabbaugebiet* unterschieden. Es zeichnet sich dadurch aus, dass keine oder nur wenig parallele Linien vorhanden sind.

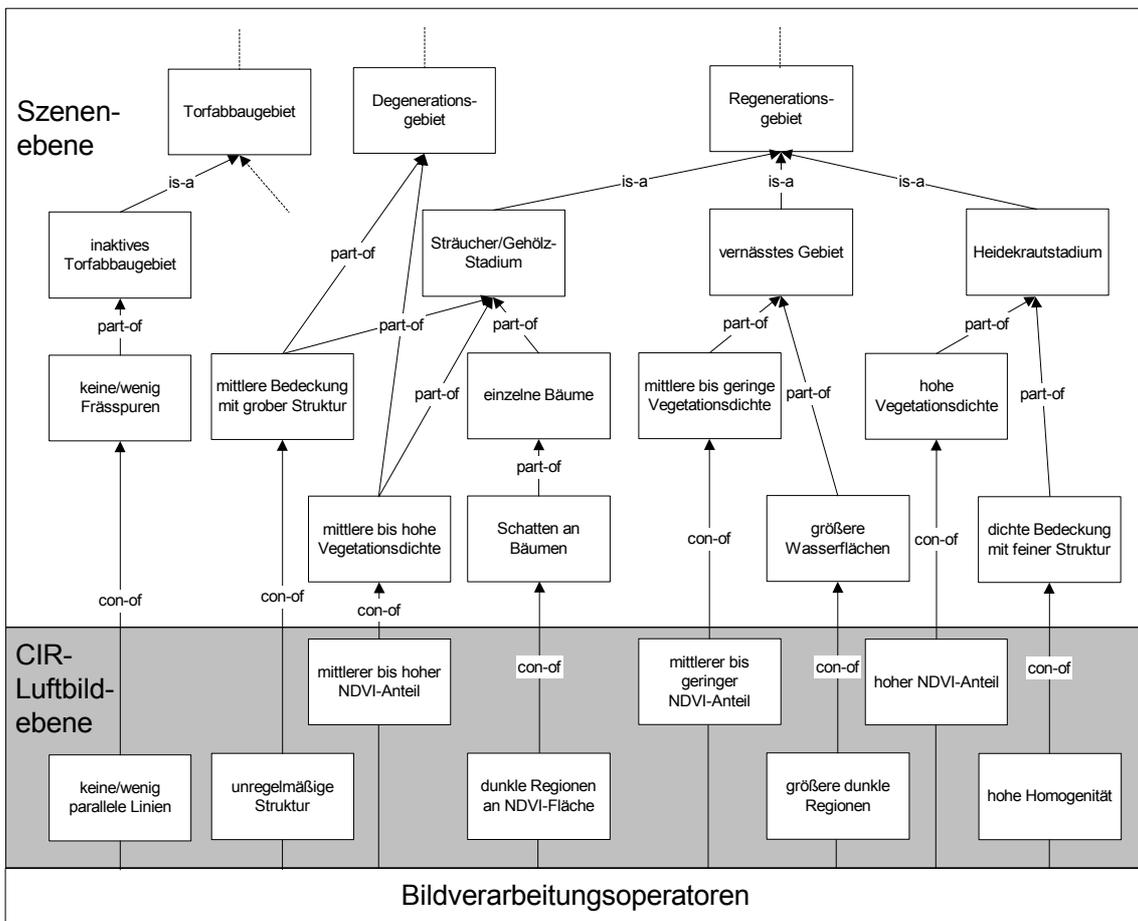


Abbildung 31: Modifikation des Konzeptnetzes zur multitemporalen Interpretation

Zudem ist mit Hilfe des temporalen Wissens nun eine Unterscheidung zwischen *De-* und *Regenerationsgebiet* möglich. Das *Regenerationsgebiet* wird weiter unterteilt in die Zustände *Sträucher/Gehölz-Stadium*, *vernässtes Gebiet* und *Heidekrautstadium*.

Das *Sträucher/Gehölz-Stadium* befindet sich von der Gehölzdichte her zwischen homogener Fläche und Wald. Daher sind *einzelne Bäume* innerhalb des Gebietes obligatorisch. Da es sich um *einzelne Bäume* handelt, können sie anhand ihrer *Schatten* erkannt werden, die sich im Luftbild als kleinere kompakte *dunkle Regionen* abbilden (siehe Abschnitt 4.3.2.3). Weitere obligatorische Teile sind eine *mittlere bis hohe Vegetationsdichte* und eine *mittlere Bedeckung mit grober Struktur*. Dies führt sowohl auf einen *mittleren bis hohen NDVI-Anteil* als auch auf eine *unregelmäßige Struktur*.

Das zweite Stadium, das *vernässte Gebiet*, ist in der Regel ein *Regenerationsgebiet* und besteht aus *größeren Wasserflächen*, die sich in der Luftbildebene als *größere dunkle Regionen* abbildet. Die gefundenen Wasserflächen deuten gewöhnlich auf eine Wiedervernässung hin, die den wesentlichen Schritt hin zur Renaturierung darstellt. Im ungünstigsten Fall kann sie auch von einem starken Regenschauer, der kurz vor der Befliegung im betrachteten Gebiet niedergegangen ist, stammen. Die Tatsache, dass das Regenwasser nicht gleich abfließt, spricht jedoch wiederum dafür, dass möglicherweise Maßnahmen gegen den Abfluss ergriffen wurden. Diese wären ebenfalls renaturierende Maßnahmen zur Wiedervernässung. Als zweiter obligatorischer Teil ist eine *mittlere bis geringe Vegetationsdichte* vorgegeben, die sich im Luftbild wiederum über den NDVI zeigt.

Die Beschreibung des *vernässten Gebietes* bezieht sich auf die klar sichtbaren Folgen von Renaturierungsmaßnahmen. Dies heißt daher nicht, dass in Gebieten ohne die beschriebenen Merkmale keine Renaturierungsmaßnahmen mit dem Ziel der Wiedervernässung durchgeführt worden sind. Die Merkmale sind lediglich in den Bildern nicht eindeutig zu erkennen.

Das *Heidekrautstadium* zeichnet sich durch eine *hohe Homogenität* aus. Obwohl Heidekraut selbst eine inhomogene Struktur aufweist, ist diese relativ fein, so dass sie nur bei sehr viel höheren Auflösungen als hier verwendet sichtbar sind. Weiterhin ist eine *hohe Vegetationsdichte* und damit ein *hoher NDVI-Anteil* obligatorisch für dieses Stadium. Ohne die Auswertung des temporalen Wissens wäre eine Unterscheidung zwischen diesem Zustand und *Grünland* nicht möglich, da die Modellierung im Konzeptnetz für beide gleich ist. Der Zustand *Degenerationsgebiet* wird über den obligatorischen Teil *mittlere bis hohe Vegetationsdichte* beschrieben, genauso wie das *Sträucher/Gehölz-Stadium* des *Regenerationsgebietes*. Auch hier wäre eine Unterscheidung ohne temporales Wissen nur schwer möglich.

4.3.3.3 Multitemporale Interpretation von Schwarzweißbildern

Ähnlich wie in Abschnitt 4.3.2.2 unterscheidet sich auch für die multitemporale Interpretation die Wissensbasis für Schwarzweißbilder von derjenigen für CIR-Farbbilder. Sie ist in Abbildung 32 komplett dargestellt. Insgesamt werden acht Zustände unterschieden. Verglichen mit der Wissensbasis zur multitemporalen Interpretation mit Farbinformationen fehlt hier der Zustand *Torfabbaugebiet in Streifenabbau*. Dies liegt daran, dass zur Erkennung der *Bunkerde* die Farbinformation meist unverzichtbar ist. Ohne die Farbinformation könnte die *Bunkerde* nur schwer vom restlichen Abbaugebiet unterschieden werden, da sie oftmals zu einem hohen Grad homogen ist. Dies führt dazu, dass *Torfabbaugebiete in Streifenabbau* im verwendeten Modell als *Torfabbaugebiet in Flächenabbau* erkannt werden.

Verglichen mit dem Konzeptnetz in Abbildung 27 hat sich die Anzahl der erkennbaren Zustände von vier auf acht verdoppelt. Damit hat die Nutzung von temporalem Wissen zu einer starken Erhöhung der Anzahl unterscheidbarer Zustände geführt. Gegenüber dem Konzeptnetz mit Nutzung der Farbinformationen fällt der Unterschied dagegen mit einem Zustand weniger gering aus. Dies darf jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass trotzdem die Fehleranfälligkeit ohne Farbinformationen erhöht ist.

Diese Fehleranfälligkeit ist der Grund, dass bei der Interpretation von Schwarzweißbildern nur jeweils ein Zustandsübergang pro interpretiertem Zeitpunkt erlaubt ist, während bei Farbbildern Zustände auch übersprungen werden können.

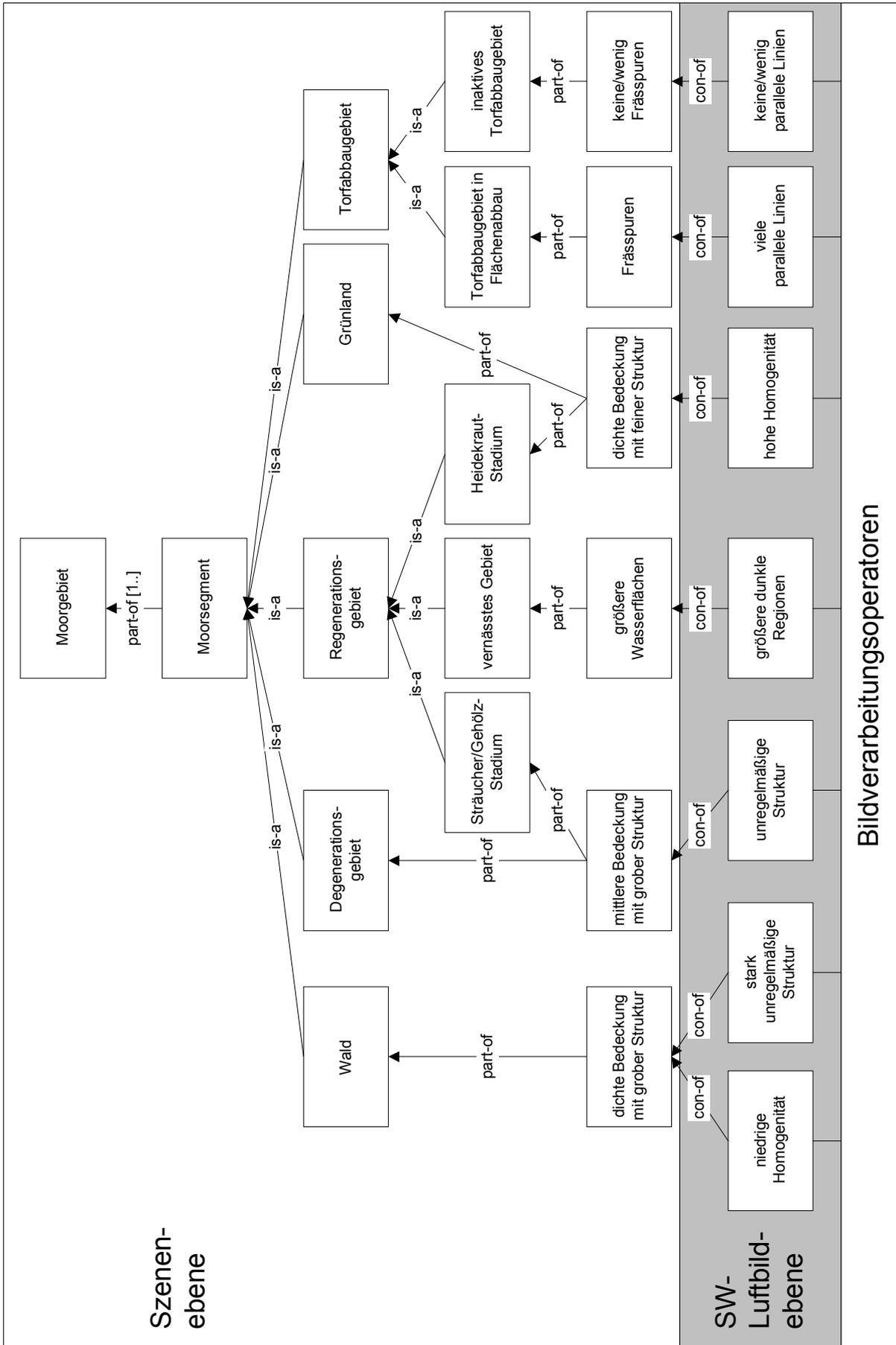


Abbildung 32: Wissensbasis zur multitemporalen Interpretation von Schwarzweißbildern

4.3.3.4 Initialsegmentierung

In der Beschreibung der Strategie der multitemporalen Interpretation (Abbildung 29) ist als erster Schritt die Initialsegmentierung angeführt. Bei der Betrachtung der Merkmale, nach denen sich Auswerter richten, wenn sie manuell eine Segmentierung durchführen wollen, erkennt man, dass dies abhängig von den unterschiedenen Moorklassen ist. Werden auch Klassen unterschieden, die radiometrisch inhomogene Strukturen beinhalten, wie beispielsweise De- oder Regenerationsgebiet, so kommt eine Gebietstrennung allein aufgrund von homogener Radiometrie nicht in Betracht. Die in diesen Prozess einbezogenen primären Merkmale sind linienförmige Strukturen, wie Straßen, Wege, Gräben. Daher werden für die Initialsegmentierung diese Strukturen verwendet. Anstatt mit Hilfe von Linienfindungsverfahren in den Bildern nach ihnen zu suchen, werden einige in der TK50 enthaltene Elemente zur Segmenttrennung verwendet (siehe Abschnitt 4.3.4).

Die so erhaltenen Segmente werden daraufhin einer weiteren Überprüfung unterzogen. Hierbei muss wieder unterschieden werden zwischen Farb- und Schwarzweißbildern. Das Verfahren hierbei entspricht weitestgehend der Resegmentierung, die im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Während für Schwarzweißbilder die Initialsegmentierung wie die Resegmentierung abläuft, wurden für Farbbilder die Bedingungen für die Akzeptanz der Segmente (Näheres siehe unten) auf das Niveau der Schwarzweißbilder angehoben.

4.3.3.5 Resegmentierung

Die Resegmentierung wird durchgeführt, um bei der multitemporalen Interpretation beim Übergang von einem Zeitpunkt zum nächsten mögliche Änderungen der aktuellen Segmentgrenzen zu detektieren und anzupassen. Für alle Gebietssegmente wird jeweils überprüft, ob eine neue Unterteilung in Teilsegmente durchgeführt werden kann oder nicht. Da eine Interpretation der Segmente vorliegt, wird diese für die Überprüfung verwendet. Die Resegmentierung wird somit nicht generell für alle Regionen durchgeführt, sondern nur für Segmente, die aus dem vorangegangenen Interpretationsschritt bestimmte Zustände aufweisen. So wird beispielsweise verhindert, dass *Degenerationsgebiete*, die in der Regel eine inhomogene Struktur aufweisen, in Teilsegmente verfallen. Hierbei muss unterschieden werden zwischen einer Resegmentierung bei Farb- und bei Schwarzweißbildern.

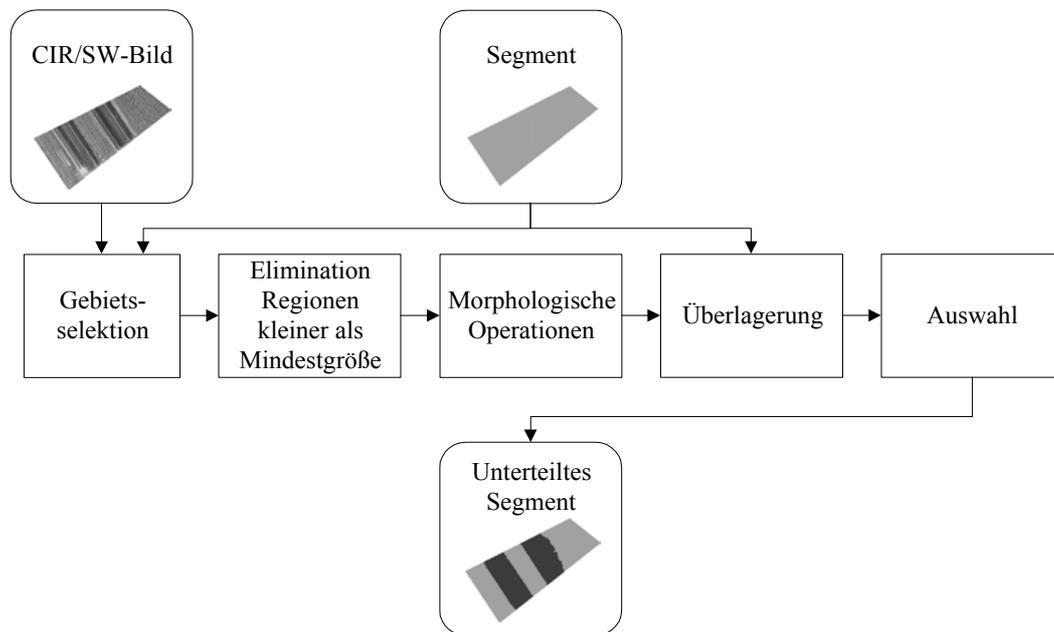


Abbildung 33: Ablauf der Resegmentierung

In Abbildung 33 ist der Ablauf der Resegmentierung dargestellt. Das Segmentbild wird zusammen mit dem CIR- bzw. Schwarzweißbild zur Verifikation verwendet. Zunächst wird eine Gebietsselektion durchgeführt, die die Grundlage der Resegmentierung bildet. Je nach dem, ob Farb- oder Schwarzweißbilder verwendet werden, verläuft die Selektion unterschiedlich (siehe unten). Daraufhin erfolgt eine Elimination kleiner Regionen, die eine Größe von einigen Pixel aufweisen. Danach werden durch morphologische Operatoren mehrere Ziele verfolgt: Es soll möglichst eine Schließung von offenen Bereichen und Ausfransungen der Segmente erreicht und Teilsegmente, die über dünne Verbindungen miteinander verbunden sind, getrennt werden. Hiernach erfolgt eine Überlagerung mit dem Ausgangssegment, um die potentiellen neuen Segmentgrenzen bestimmen zu können. Eine Auswahl der letztlich übernommenen neuen Teilsegmente schließt sich an. Diese wird in Abhängigkeit von der Art des Eingangsbildes und der Vorinterpretation des Segmentes durchgeführt. Nachfolgend wird hierauf näher eingegangen.

Colorinfrarot(CIR)-Bilder

In *Degenerationsgebieten* wird eine Resegmentierung nur dann durchgeführt, wenn eine Überprüfung auf *parallele Linien* darauf hinweist, dass inzwischen in einem größeren Teil Torfabbau betrieben wird. Dies wird dadurch verifiziert, dass über den entsprechenden Merkmalsanalyseoperator eine Verifikation auf *parallele Linien* durchgeführt wird. Nur bei Vorliegen eines Mindestwertes beim Verifikationsergebnis erfolgt eine Resegmentierung. Der Hintergrund hierbei ist, dass in *Degenerationsgebieten* oftmals Vegetationsblöcke unregelmäßig auftreten. Durch die Resegmentierung zerfielen diese Gebiete in kleine Einzelsegmente, obwohl sie aufgrund der durchgeführten Klasseneinteilung als ein Ganzes erhalten bleiben müssen.

In den Klassen *Torfabbaugebiet* und *inaktives Torfabbaugebiet* wird grundsätzlich immer eine Resegmentierung durchgeführt.

In den übrigen Moorklassen findet keine Überprüfung auf eine Resegmentierung statt.

Die Gebietsselektion in CIR-Bildern wird für jedes zu untersuchende Segment durch eine Unterteilung in Vegetation und Nichtvegetation durchgeführt. Weiter bearbeitet werden die Regionen mit einem negativen Wert für den Vegetationsindex.

Die Bedingungen für das Akzeptieren der neuen Teilsegmente lauten:

- Teilsegment weist absolute Mindestgröße auf. Hier: $10.000 \text{ Pixel} \hat{=} 2.500\text{m}^2$
- Teilsegment muss einen Randbereich innerhalb des Ausgangssegmentes einnehmen. Hier wird das Vorwissen verwendet, dass sich Änderungen von Moorklassen in der Regel am Gebietsrand abspielen, so dass es z.B. für Maschinen einen direkten Zugang aus dem Segment heraus gibt. Die Bedingung, dass das Segment einen Randbereich einnehmen soll, wird innerhalb einer Pufferzone verifiziert, so dass neu entstandene Wege, die zwischen dem Rand des Ausgangssegmentes und dem neuen Teilsegment verlaufen, die Resegmentierung nicht verhindern.

Schwarzweißbilder

Die Resegmentierung wird in *Degenerationsgebieten* nur dann durchgeführt, wenn das Ergebnis der Überprüfung auf *parallele Linien* einen Mindestwert aufweist.

Die Gebietsselektion in Schwarzweißbildern erfolgt durch eine Trennung zwischen Gebieten mit und ohne *parallele Linien*. Weiterverarbeitet werden die Teilsegmente ohne *parallele Linien*.

Die Fehlermöglichkeit bei der Resegmentierung ist bei Schwarzweißbildern durch die fehlenden Farben größer als bei Farbbildern. Daher sind die Bedingungen für das Akzeptieren der neuen Teilsegmente schärfer:

- Teilsegment befindet sich am Rand des Ausgangssegmentes
- Teilsegment weist absolute Mindestgröße auf. Hier: $100.000 \text{ Pixel} \hat{=} 25.000\text{m}^2$
- Teilsegment weist relative Mindestgröße auf. Hier: 2% vom Ausgangssegment
- Die Kompaktheit des Segmentes unterschreitet einen vorgegebenen Maximalwert. Dieser lautet hier: $M_{\text{Kompaktheit}} \leq 50$
- Die Länglichkeit des Segmentes unterschreitet einen vorgegeben Maximalwert. Dieser lautet hier: $M_{\text{Länglichkeit}} \leq 50$

Zur Berechnung von Länglichkeit und Kompaktheit siehe Abschnitt 3.3.3.

4.3.3.6 Bewertung konkurrierender Hypothesen

Das in Abbildung 30 dargestellte Zustandsübergangsdiagramm wird zur Nutzung des temporalen Wissens verwendet. Dies erfolgt durch das Erweitern der Konzeptnetze um *temporale Relationen*, wie in Abschnitt 3.5.4 beschrieben. Im Verlauf der Interpretation werden für bereits interpretierte Segmente Hypothesen für neue Zustände aufgestellt. Je nach Wissensbasis sind immer unterschiedliche Zustandsübergänge möglich. Hierdurch entstehen konkurrierende Hypothesen. Die im System implementierte Strategie betreffend der Überprüfungsreihenfolge der Hypothesen (siehe Abschnitt 3.5.5) wirkt sich auf die Interpretationseffizienz aus und nutzt folgende in Abschnitt 3.5.4 beschriebenen Attribute: *Anfangszeitpunkt*, *Zustandsdauer*, *Dauer des Zustandsüberganges*, *Zustandswahrscheinlichkeit*, *Zustandsübergangswahrscheinlichkeit*. Daher stellt sich die Frage nach der Bestimmung dieser Parameter für die hier vorliegende Anwendung.

Die Bestimmung eines jährlichen *Anfangszeitpunktes* macht für diese Anwendung keinen Sinn, da die Veränderungen, die sich ergeben, nicht im jährlichen Zyklus erfolgen. Sie sind meist längerfristig und dauern in der Regel länger als ein Jahr. Eine a priori Bestimmung von *Zustandsdauern* für diese Anwendung ist ebenfalls problematisch, da die Zeiträume, in denen sich Veränderungen ergeben, sehr von den lokalen Gegebenheiten abhängen. Damit sind nicht nur die lokalen Gegebenheiten des gesamten Testgebietes gemeint, sondern auch einzelner Abschnitte. Sie können abhängen vom Grundwasserspiegel und von der Bodenbeschaffenheit. Diese Gegebenheiten sind in der Regel nicht oder nur sehr grob bekannt. Es wäre möglich, mit dem Wissen über die Torfmächtigkeit und dem durchschnittlichen jährlichen Abbau im Testgebiet eine theoretische Dauer für den Torfabbau vorherzusagen. Diese würde jedoch nur zutreffen, wenn der Torfabbau kontinuierlich durchgeführt werden würde. Dies ist jedoch nicht immer gegeben. Es werden immer wieder aus unterschiedlichen Gründen (z.B. betriebswirtschaftliche Gründe) Pausen eingelegt. Daher kann es vorkommen, dass die Pausen nicht beobachtbar sind, da sie zwischen zwei aufeinander folgenden Aufnahmezeitpunkten liegen. Folglich ist eine Vorhersage über die *Zustandsdauer* auch für Torfabbaugebiete nicht sinnvoll.

Eine Steuerung der Interpretation wurde in der vorliegenden Anwendung über die Attribute *Zustandswahrscheinlichkeit* und *Zustandsübergangswahrscheinlichkeit* durchgeführt. Mit der *Zustandswahrscheinlichkeit* wird a priori festgelegt, welche Zustände wahrscheinlicher als andere sind. Für den Interpretationsverlauf ist es somit wichtig, wie die Werte der Attribute relativ zueinander lauten. Die absoluten Werte sind in diesem Zusammenhang nicht von Interesse.

Die *Zustandswahrscheinlichkeit* ist wichtig für die Interpretation der Bilder des ersten Zeitpunktes. Um die Interpretationseffizienz zu steigern, werden die Zustände mit einer höheren Auftretenswahrscheinlichkeit bevorzugt verifiziert. Zusätzlich zur Auftretenswahrscheinlichkeit wird der geschätzte Verifikationsaufwand der Zustände berücksichtigt. Wenn beispielsweise ein Zustand 1 eine geringfügig höhere Auftretenswahrscheinlichkeit aufweist als Zustand 2, der geschätzte Verifikationsaufwand von Zustand 1 jedoch sehr viel höher ist als bei Zustand 2, so ist es vorteilhafter, zuerst eine Verifikation von Zustand 2 durchzuführen und dann von Zustand 1. Im vorliegenden Fall ist z.B. der zeitliche Aufwand zur Verifikation der *De- und Regenerationsgebiete* und der *Torfabbaugebiete* höher als bei den anderen Zuständen.

Unter Berücksichtigung dieser Tatsache und einer aus der Flächenbilanz einer Moorklassifikation von 1994 für das Gebiet Niedersachsen ([55]:41) abgeleiteten Auftretenswahrscheinlichkeit ergibt sich folgende sinnvolle Reihenfolge in der Vorgabe der *Zustandswahrscheinlichkeiten*:

1. Grünland
2. Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium
3. Wald
4. Vernässtes Gebiet
5. Degenerationsgebiet, Regenerationsgebiet im Gehölzstadium
6. Torfabbaugebiete

Die Gebiete erhalten abnehmende *Zustandswahrscheinlichkeiten*.

Die Bestimmung der *Zustandsübergangswahrscheinlichkeit* wird von dem Vorwissen geprägt, dass der wahrscheinlichste Zustandsübergang von einem Zeitpunkt zum nächsten immer der zu sich selbst ist. Somit erhält der Zustandsübergang zum eigenen Zustand immer die höchste Wahrscheinlichkeit. Die übrigen Wahrscheinlichkeiten werden gemäß obiger Reihenfolge der Zustände für die *Zustandswahrscheinlichkeiten* bestimmt.

4.3.4 Datengrundlage

Für die multitemporale Interpretation wurden Schwarzweiß(SW)- und Colorinfrarot(CIR)-Luftbilder aus mehreren Zeitpunkten verwendet. Das Testgebiet befindet sich im Toten Moor am Steinhuder Meer nordwestlich von Hannover. Unterschieden wurden die Bildfolgen 1 und 2, die teilweise unterschiedliche Zeitpunkte und eine verschobene Testregion beinhalten.

Die Luftbilder wurden mit einer Scan-Pixelgröße von 50 μm für den Zeitpunkt 1989 und von 20 μm für die restlichen Zeitpunkte gescannt. Die polynomiale Entzerrung der Luftbilder ist für das verwendete Gebiet zulässig, da es sich ausschließlich im Flachland befindet. Leider fehlten in den zur Verfügung stehenden Luftbildern für einige Zeitpunkte Teile des Testgebietes. Diese fehlenden Teile mussten aus der Interpretation des jeweiligen Zeitpunktes ausgeschlossen werden.

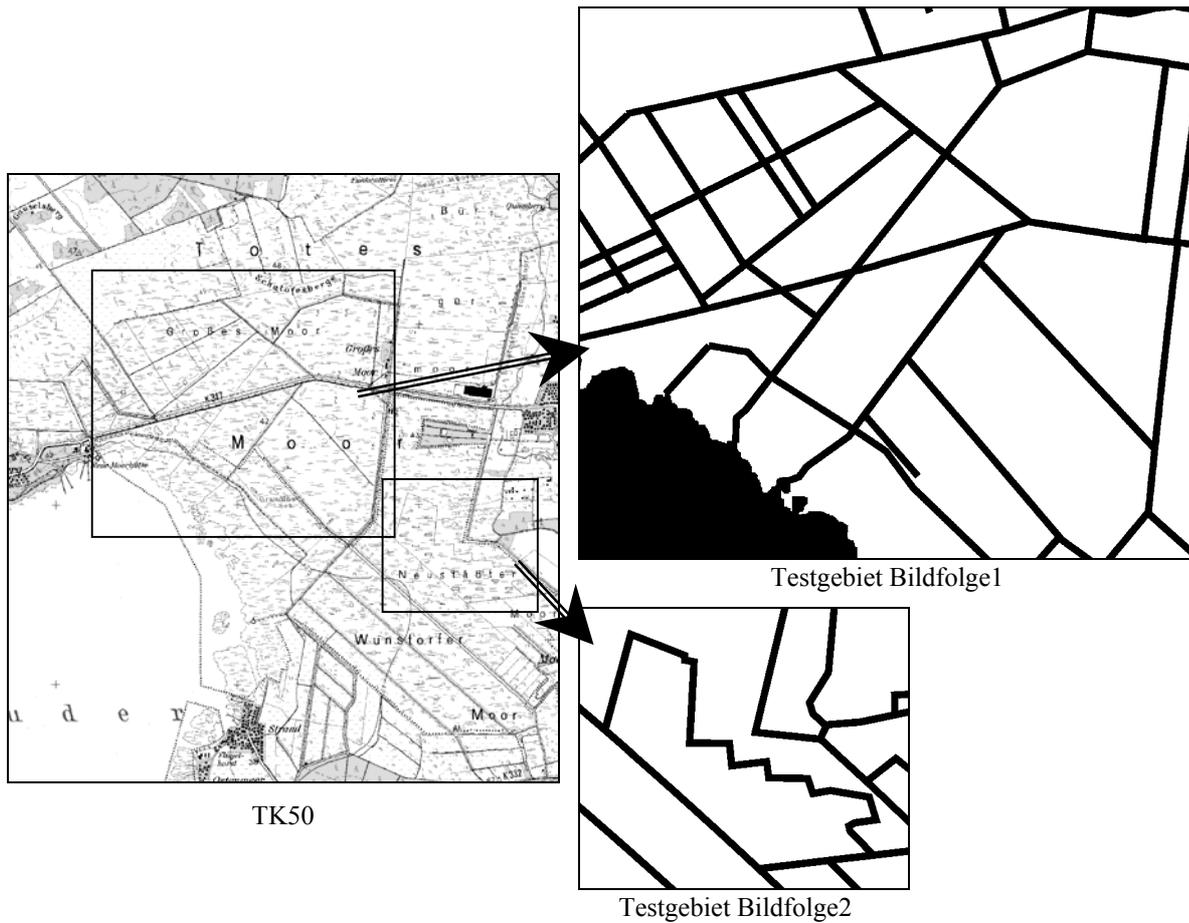


Abbildung 34: Geo-Daten des Testgebietes aus der TK50

Bildfolge	Koordinaten (Gauß-Krüger)	Größe (m)	Größe (Pixel)
1	(3524432, 5817636) (3527720, 5820600)	3288 x 2964	6572 x 5928
2	(3527580,5816775) (3529330, 5818275)	1750 x 1500	3500 x 3000

Aufnahmezeitpunkt	Art	Befliegungsmaßstab	Entzerrung	Bildfolge	Bodenpixelgröße des Testbildes
26.2.1975*	SW	1:12.500	polynomial	1	0,5m
10.4.1981*	SW	1:12.500	polynomial	1	0,5m
02.5.1986*	SW	1:12.500	polynomial	1	0,5m
16.5.1989**	CIR	1:10.000	Orthophoto	1	0,5m
20.7.1998	CIR	1:10.000	polynomial	1	0,5m
23.4.1962*	SW	1:12.000	polynomial	2	0,5m
06.4.1969*	SW	1:12.000	polynomial	2	0,5m
02.5.1981*	SW	1:12.500	polynomial	2	0,5m
16.5.1989**	CIR	1:10.000	Orthophoto	2	0,5m
20.7.1998	CIR	1:10.000	polynomial	2	0,5m

* mit freundlicher Genehmigung des LGN (Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen)

** mit freundlicher Genehmigung des KGH (Kommunalverband Großraum Hannover)

Weiter wurden Geo-Daten aus der TK50 (Stand 1996) verwendet. Aus [44] wurden die Straßen, Wege, Gräben und sonstigen Gewässer vektorisiert. Daraufhin wurden sie nach einer Vektor-Raster-Transformation in ein Rasterbild der Größe der Testbilder eingefügt. Die linienförmigen Elemente wurden um mehrere Pixel verbreitert. Diese Verbreiterung ging über die erwartete Breite der Straßen und Gräben hinaus, um die Auswirkung von eventuellen Lagefehlern aus der Entzerrung zu verringern. Das so entstandene Rasterbild ist in Abbildung 34 dargestellt und wurde als Maskierung für die Segmentierung verwendet (siehe Abschnitt 4.3.3.5). Bezugnehmend auf die zeitliche Differenz zwischen der TK50 und den ersten Zeitpunkten der Bildfolgen wurde angenommen, dass sich die betrachteten Geo-Daten in dem Gebiet nicht relevant verändert haben und daher als Initialsegmentierung verwendbar sind.

4.3.5 Ergebnisse

Für die Interpretation wurden die in Abschnitt 4.3.4 beschriebenen Bilddaten verwendet. Die Ergebnisse sind für die Bildfolge 1 in Abbildung 35 bis Abbildung 39 und für die Bildfolge 2 in Abbildung 40 bis Abbildung 44 dargestellt. Auf die in den Abbildungen vorhandenen Zahlen wird unten in diesem Abschnitt und in der nachfolgenden Bewertung eingegangen. Für einige Zeitpunkte reichten die zur Verfügung stehenden Bilddaten nicht aus, um das gesamte Testgebiet abzudecken. In diesen Fällen wurden die Segmente, die nicht vollständig in den Bildern vorhanden waren, für den entsprechenden Zeitpunkt nicht in die Interpretation einbezogen. Dies bedeutet, dass für den ersten Zeitpunkt die Segmente nicht interpretiert wurden (Segmente wurden im Ergebnis weggelassen). Für die übrigen Zeitpunkte behielten die Segmente ihre Bedeutung vom letzten Zeitpunkt bei.

Bildfolge 1

Wie zu erkennen ist, wurde für den Zeitpunkt 1975 in Abbildung 35 in der Initialsegmentierung nur die Unterteilung aufgrund der Geo-Daten durchgeführt. Eine weitere Unterteilung war aufgrund der Gebietsstruktur nicht möglich. Die meisten Segmente erhielten die Bedeutung *Degenerationsgebiet*. Einige Segmente im Nordwesten des Testgebietes wurden aufgrund der erkannten parallelen Linien als *Torfabbaugebiet* interpretiert.

Zum Zeitpunkt 1981 hin erfolgte eine Resegmentierung für ein Segment im nordöstlichen Teil des Gebietes (siehe Abbildung 36). Der Grund liegt darin, dass in einem Teil des Gebietes parallele Linienstrukturen detektiert wurden (siehe Abschnitt 4.3.3.5). In der Interpretation wurde das entsprechende Teilsegment auch als *Torfabbaugebiet* erkannt. Die übrigen Segmente wurden als unverändert eingestuft.

Für den Zeitpunkt 1986 in Abbildung 37 wurde für ein weiteres Segment eine Resegmentierung durchgeführt, ebenfalls mit Torfabbau im Teilsegment. Die Anzahl der als *Torfabbaugebiet* erkannten Segmente hat sich erhöht. Zudem wurde ein Segment aufgrund der stark unregelmäßigen Struktur als *Wald* erkannt. In einigen zuvor als *Torfabbaugebiet* klassifizierten Segmenten konnten die Linienstrukturen nicht wiedergefunden werden, weswegen diese Gebiete als inaktive Torfabbaugebiete interpretiert wurden.

Für das Jahr 1989 lagen CIR-Luftbilder vor (Abbildung 38). Im nordwestlichsten Segment wurde nun auch *Grünland* erkannt. Einige weitere *Torfabbaugebiete* wurden als *inaktiv* eingeschätzt. Zudem wurde in einem *Torfabbaugebiet* Vegetation detektiert und das Gebiet aufgrund dessen als *Wald* eingestuft.

Im Testgebiet haben sich für den Aufnahmezeitpunkt 1998 (Abbildung 39) die stärksten Veränderungen aller hier betrachteten Zeitübergänge ergeben. Zum ersten Mal wurde *Torfabbau in Streifenmethode* detektiert. In einigen Segmenten wurde auch *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium* erkannt. Einige weitere *Degenerationsgebiete* wurden zudem als *Wald* detektiert. Einige *inaktive Torfabbaugebiete* wurden wieder als aktiv eingestuft.

Bildfolge 2

Für das Jahr 1962 (Abbildung 40) ergab die Interpretation für fast alle Segmente *Degenerationsgebiet*. Nur zwei Segmente erhielten andere Interpretationen: Eines aufgrund seiner Homogenität *Grünland*, ein anderes aufgrund seiner stark unregelmäßigen Struktur *Wald*.

Die Aufnahme aus 1969 (Abbildung 41) führte zu einer Resegmentierung des zentralen Segmentes Nr.8 mit Aufspaltung in zwei Teilsegmente. Das südliche davon wurde als *Torfabbaugebiet* interpretiert, da parallele Linien detektiert wurden.

Für den Zeitpunkt 1981 (Abbildung 42) erfolgte keine Resegmentierung. Auch der nördliche Teil des zentralen Segmentes (Segment Nr.11) hat seinen Zustand von *Degenerationsgebiet* zu *Torfabbaugebiet* verändert.

Die Aufnahme aus dem Jahr 1989 (Abbildung 43) führte zu mehreren Resegmentierungen. Das Segment Nr. 11 wurde in mehrere Teilsegmente aufgespalten. Das nördlichste wurde aufgrund der unregelmäßigen Struktur und der Farbe als *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium* interpretiert, das südliche aufgrund der fehlenden parallelen Linien als *inaktives Torfabbaugebiet*. Zudem änderten sich für einige andere Segmente die Zustände von *Degenerationsgebiet* nach *inaktives Torfabbaugebiet* und nach *Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium*.



1975

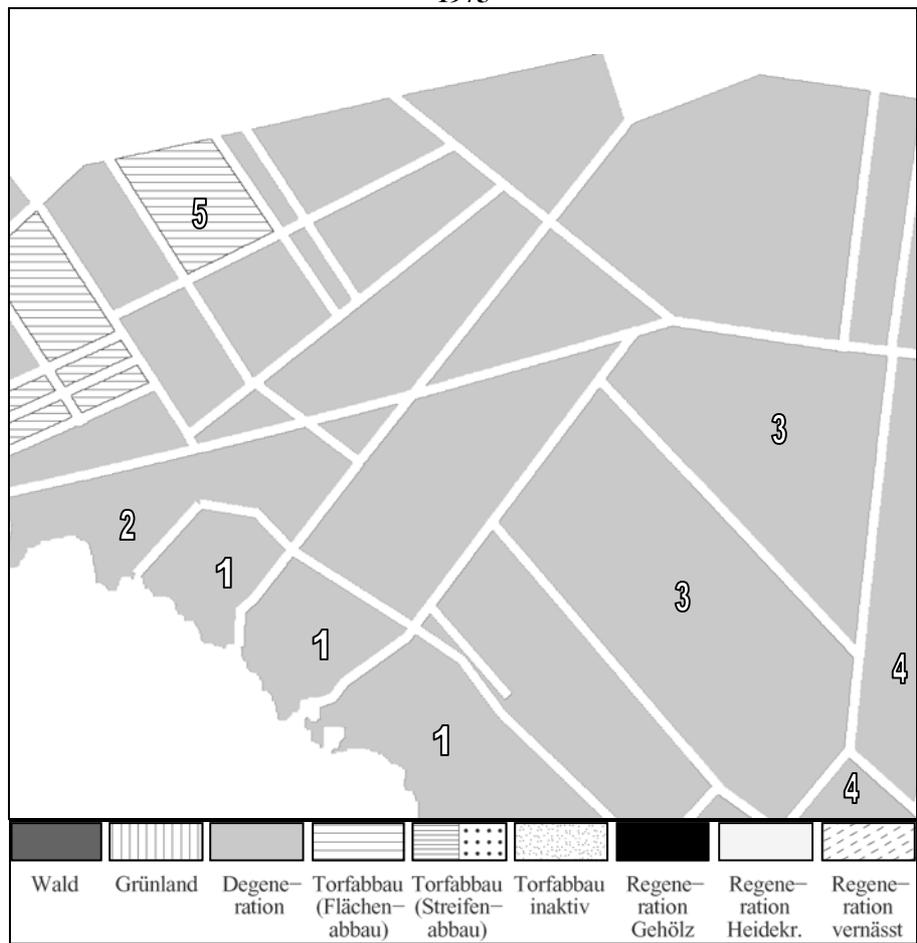


Abbildung 35: Bildfolge1: SW-Luftbild 1975 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)



1981

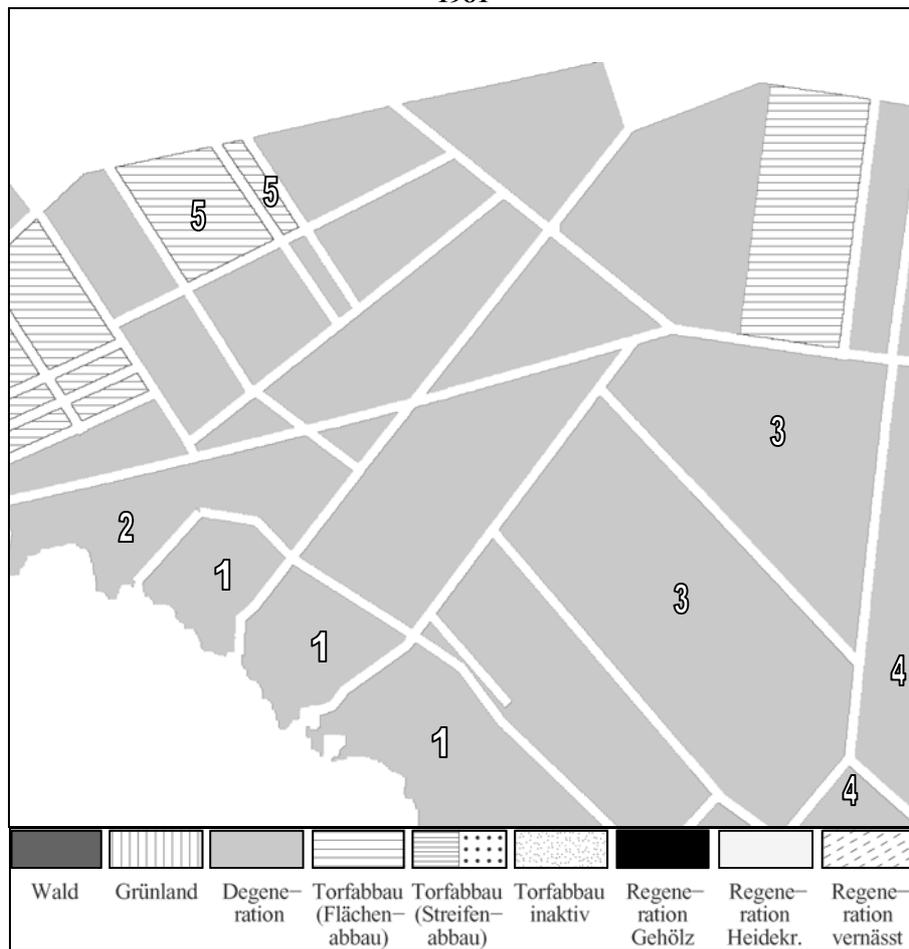


Abbildung 36: Bildfolge: SW-Luftbild 1981 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)



1986

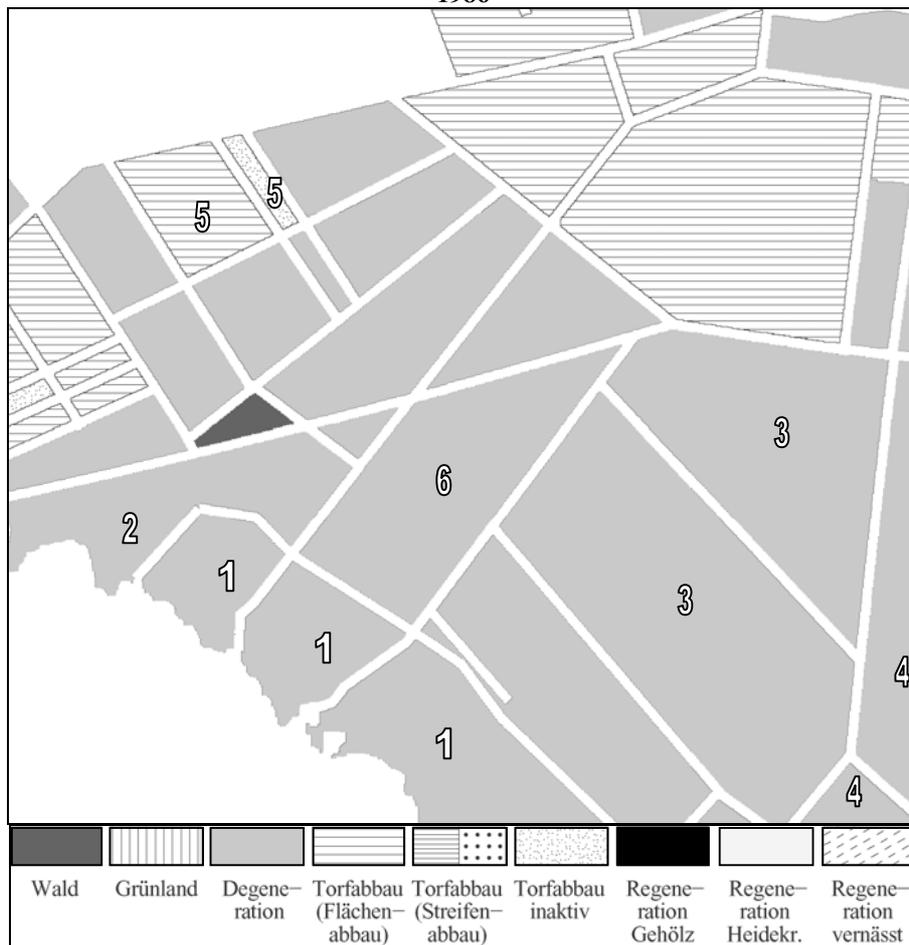
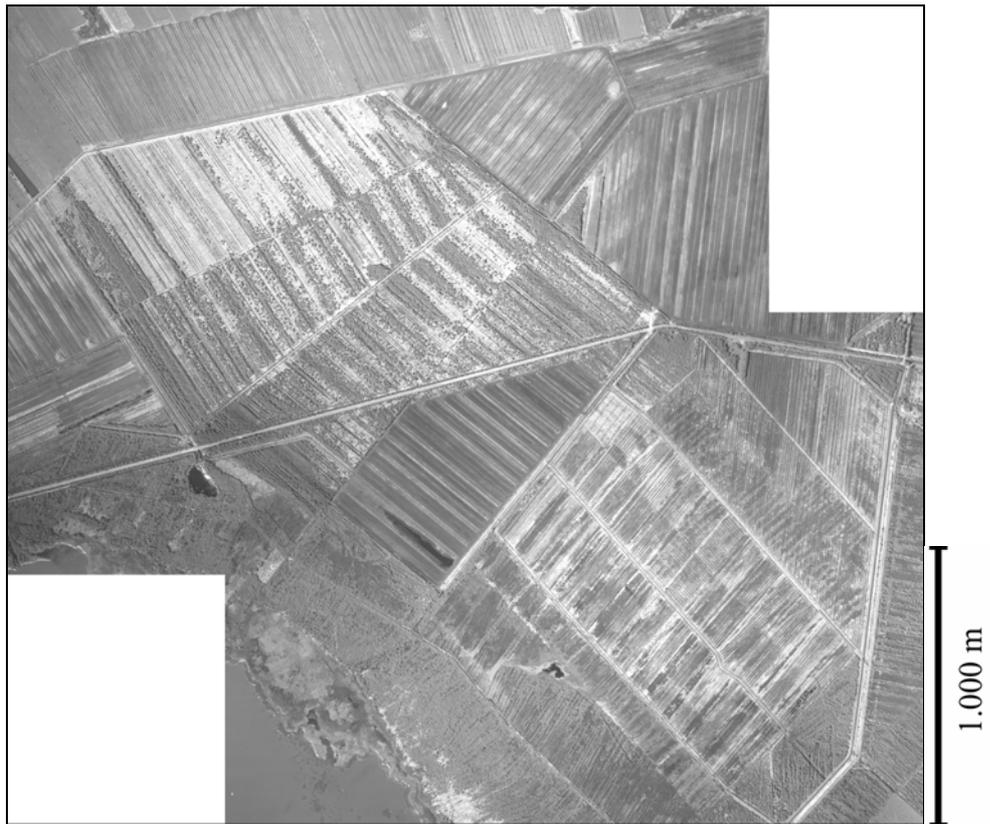


Abbildung 37: Bildfolge1: SW-Luftbild 1986 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)



1989 (Farbabbildungen siehe Seite 104)

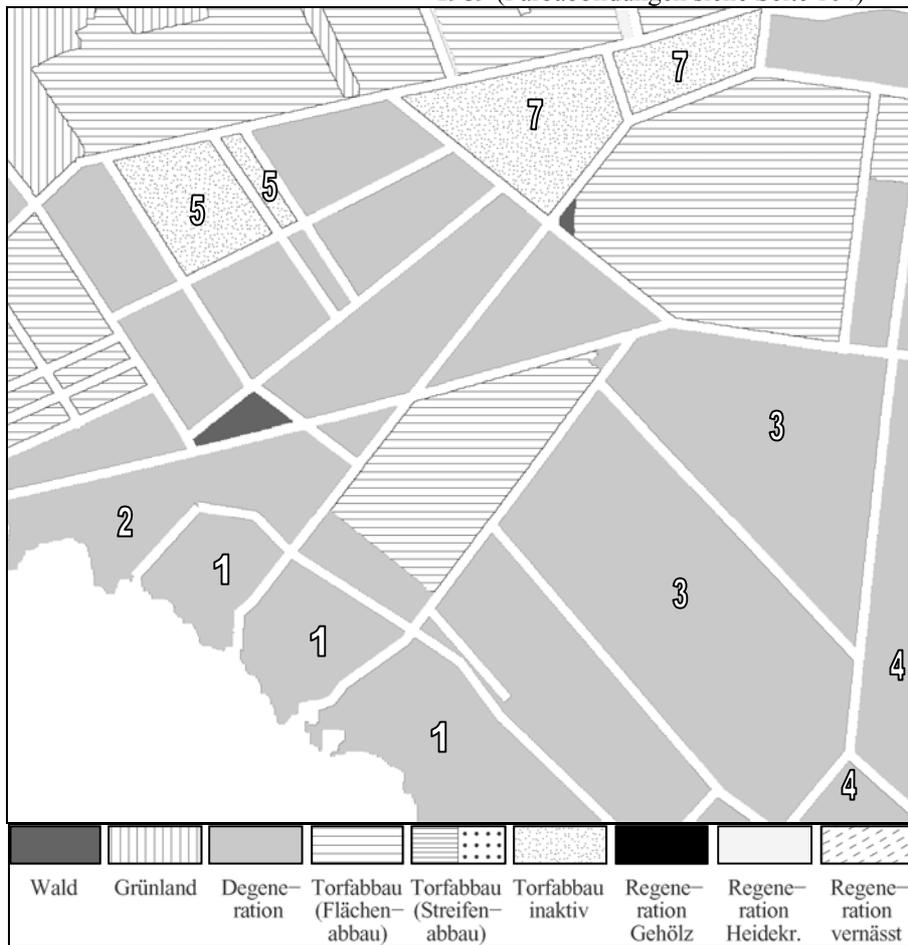
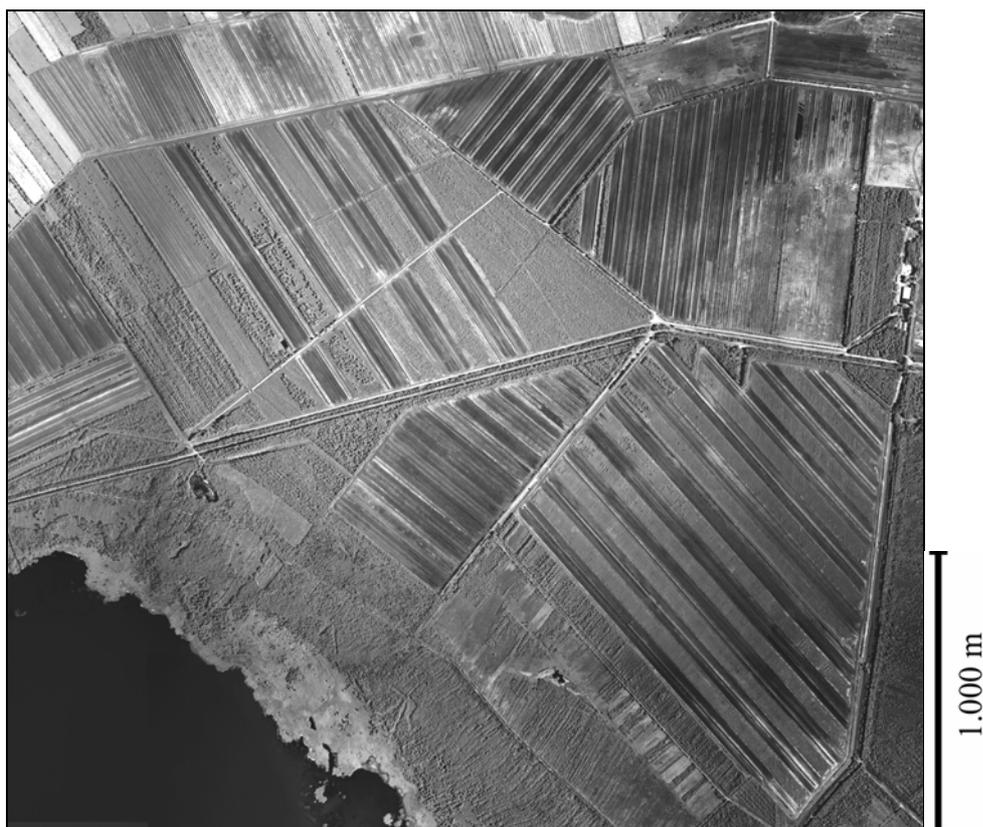


Abbildung 38: Bildfolge 1: CIR-Luftbild 1989 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)



1998 (Farbabbildungen siehe Seite 104)

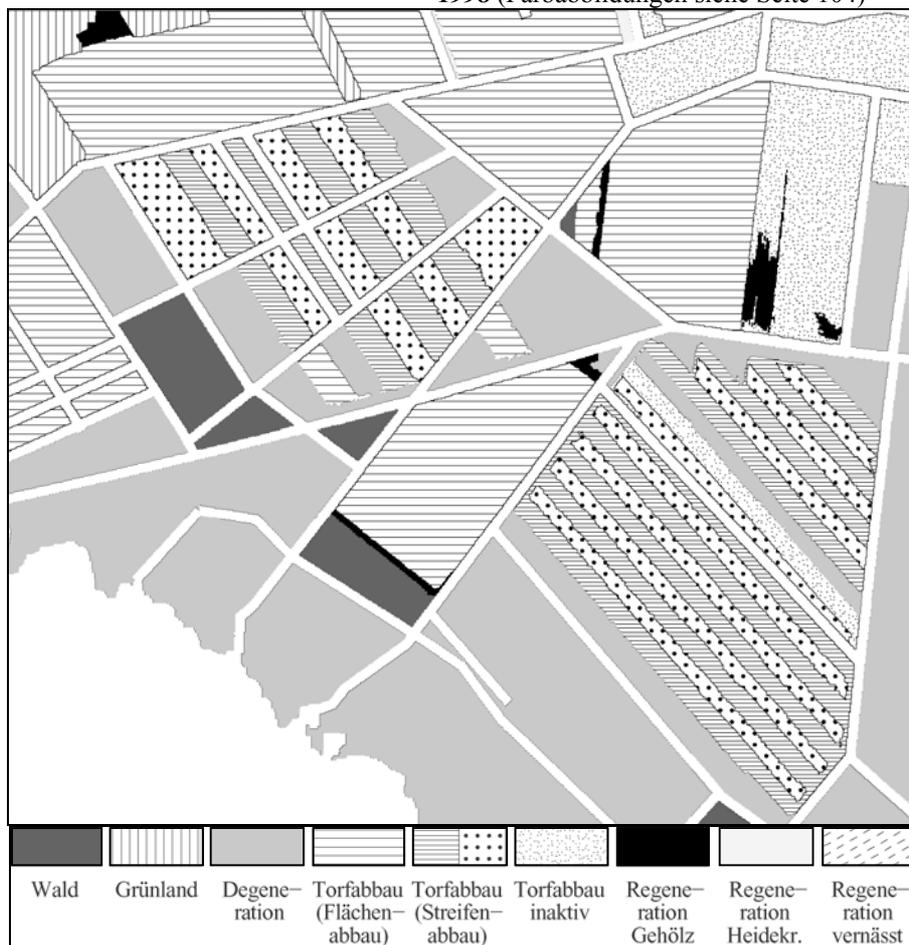


Abbildung 39: Bildfolge1: CIR-Luftbild 1998 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)



1962

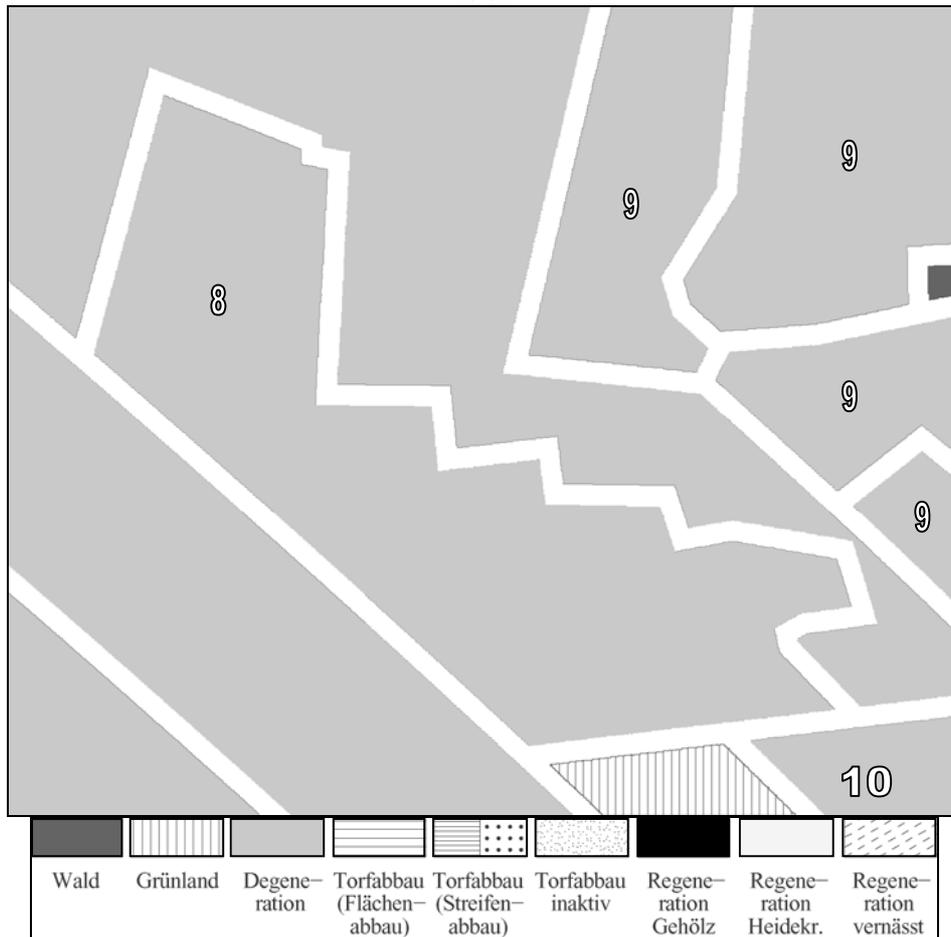
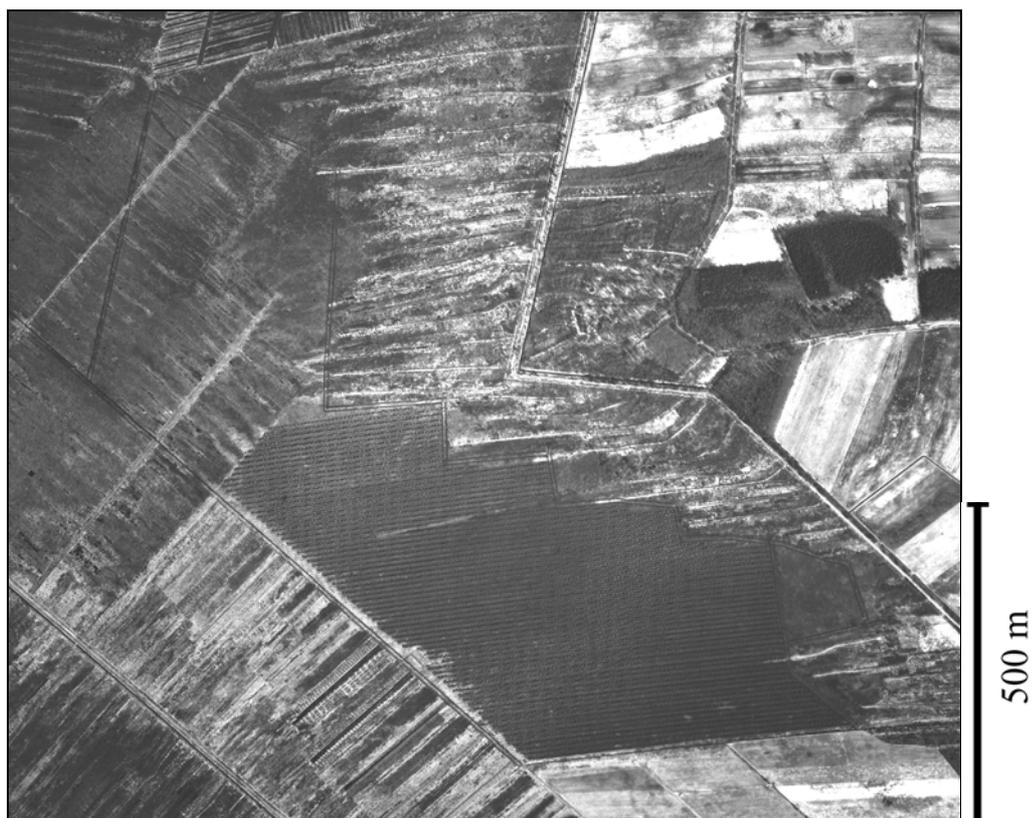
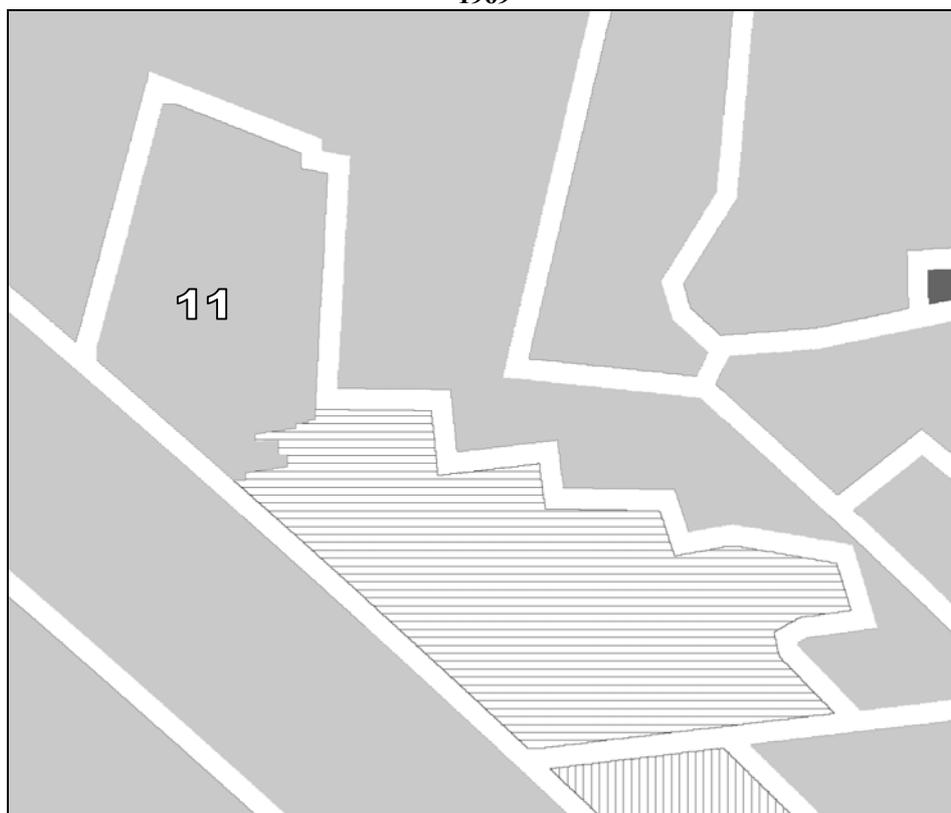


Abbildung 40: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1962 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)



1969



Wald	Grünland	Degeneration	Torfabbau (Flächenabbau)	Torfabbau (Streifenabbau)	Torfabbau inaktiv	Regeneration Gehölz	Regeneration Heidekr.	Regeneration vernässt

Abbildung 41: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1969 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)



1981

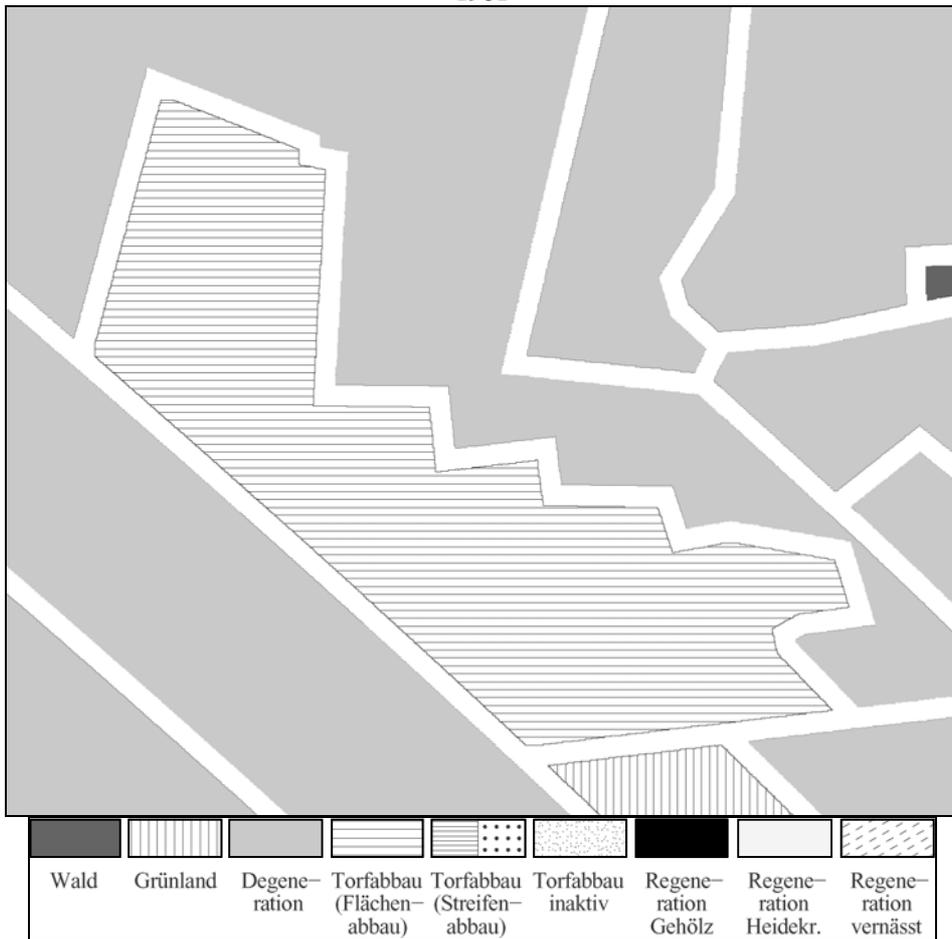
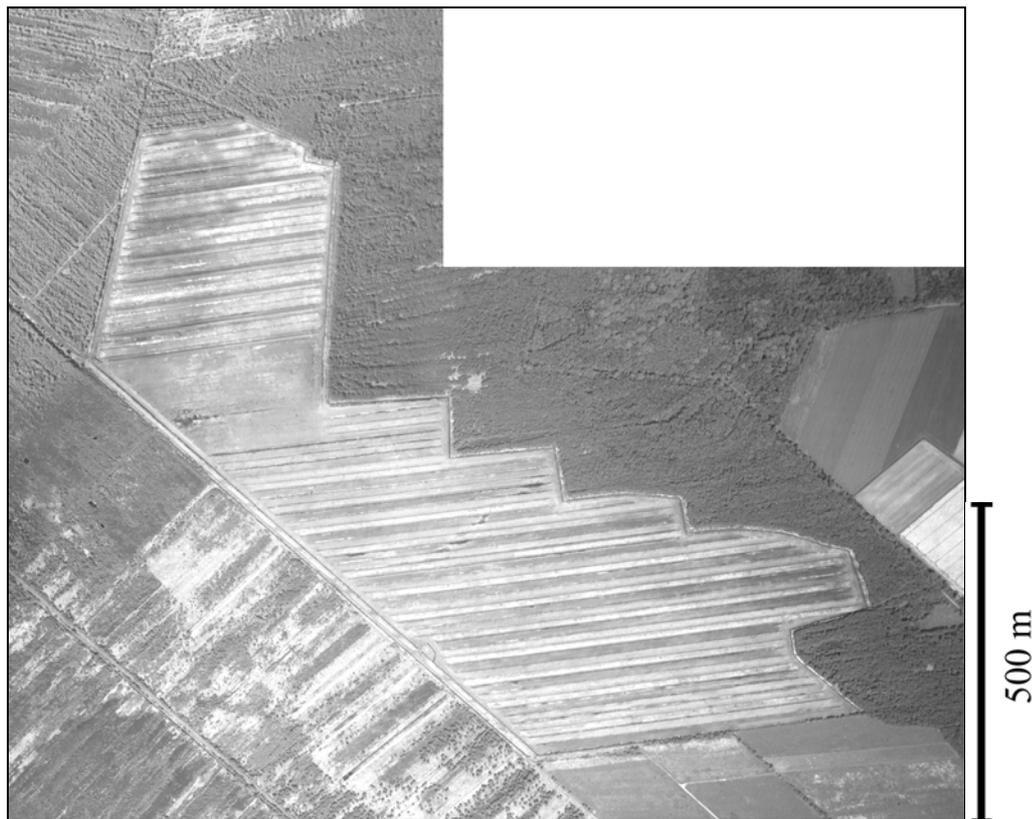


Abbildung 42: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1981 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)



1989 (Farbabbildungen siehe Seite 104)

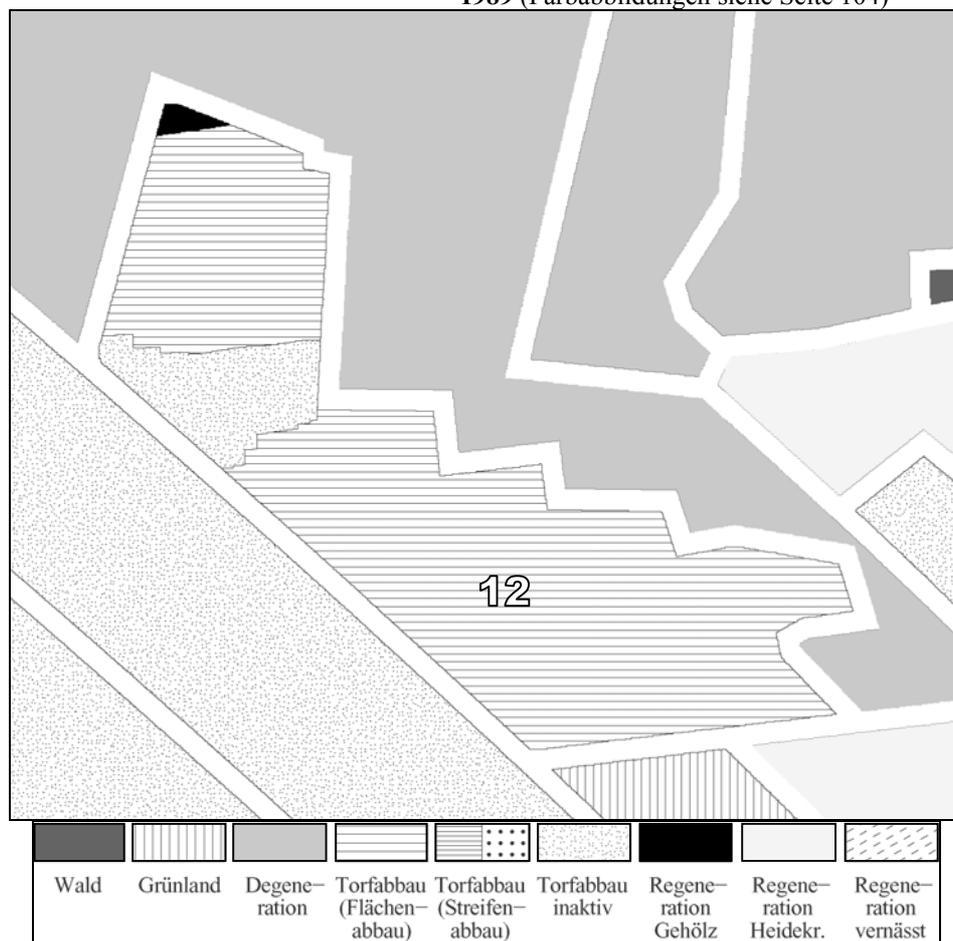


Abbildung 43: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1989 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)



1998 (Farbabbildungen siehe Seite 104)

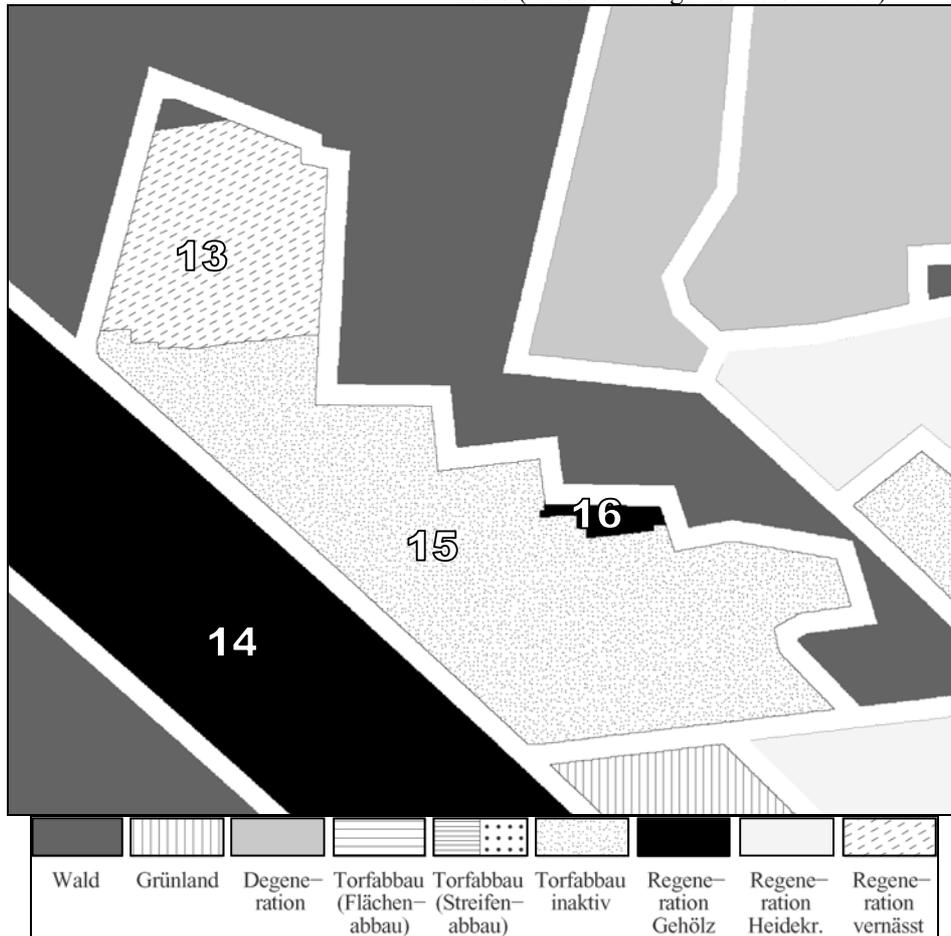


Abbildung 44: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1998 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)

Tabelle 2: Anzahl Segmente je Klasse für Bildfolge 1

Zeitpunkt	1975	1981	1986	1989	1998
Resegmentiert (Initialsegmentierung für 1975)	35	1	1	11	44
Zustandsveränderungen gegenüber vorher		3	6	8	60
Gesamtzahl der Segmente	35	36	41	52	96
Bearbeitete Segmente	35	36	37	45	96
Wald	0	0	1	2	6
Grünland	0	0	0	3	3
Degenerationsgebiet	29	27	26	26	21
Torfabbaugebiet in Flächabbau	6	9	12	15	20
Torfabbaugeb. in Streifenabbau, Abbausegm.	0	0	0	0	13
Torfabbaugeb. in Streifenabbau, Bunkerde	0	0	0	0	18
Inaktives Torfabbaugebiet	0	0	2	4	7
Regenerationsgebiet im Gehölzstadium	0	0	0	0	6
Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium	0	0	0	2	2
Regenerationsgebiet vernässt	0	0	0	0	0

(Werte beschreiben Anzahl der Segmente)

Tabelle 3: Flächenanteile je Klasse für Bildfolge 1

Zeitpunkt	1975	1981	1986	1989	1998
Gesamtgebiet	6,53km ²	6,53km ²	6,91km ²	7,58km ²	7,58km ²
Wald	0,00%	0,00%	0,41%	0,43%	3,32%
Grünland	0,00%	0,00%	0,00%	2,39%	2,39%
Degenerationsgebiet	94,89%	89,24%	75,81%	63,78%	35,11%
Torfabbaugebiet in Flächabbau	5,11%	10,76%	23,26%	26,34%	24,55%
Torfabbaugeb. in Streifenabbau, Abbausegm.	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	13,79%
Torfabbaugeb. in Streifenabbau, Bunkerde	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	10,94%
Inaktives Torfabbaugebiet	0,00%	0,00%	0,52%	6,96%	8,85%
Regenerationsgebiet im Gehölzstadium	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,95%
Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium	0,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%
Regenerationsgebiet vernässt	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

(Werte in % beschreiben Anteil der Teilgebiete am jeweiligen Gesamtgebiet)

Tabelle 4: Anzahl Segmente je Klasse für Bildfolge 2

Zeitpunkt	1962	1969	1981	1989	1998
Resegmentiert (Initialsegmentierung für 1962)	11	3	0	3	0
Zustandsveränderungen gegenüber vorher		3	1	7	9
Gesamtzahl der Segmente	11	14	14	17	17
Bearbeitete Segmente	11	14	14	14	17
Wald	1	1	1	1	4
Grünland	1	1	1	1	1
Degenerationsgebiet	9	9	8	3	2
Torfabbaugebiet in Flächabbau	0	3	4	5	0
Torfabbaugeb. in Streifenabbau, Abbausegm.	0	0	0	0	0
Torfabbaugeb. in Streifenabbau, Bunkerde	0	0	0	0	0
Inaktives Torfabbaugebiet	0	0	0	4	5
Regenerationsgebiet im Gehölzstadium	0	0	0	1	2
Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium	0	0	0	2	2
Regenerationsgebiet vernässt	0	0	0	0	1

(Werte beschreiben Anzahl der Segmente)

Tabelle 5: Flächenanteile je Klasse für Bildfolge 2

Zeitpunkt	1962	1969	1981	1989	1998
Gesamtgebiet	2,26km ²				
Wald	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	31,03%
Grünland	1,77%	1,77%	1,77%	1,77%	1,77%
Degenerationsgebiet	98,06%	81,68%	72,54%	44,17%	17,76%
Torfabbaugebiet in Flächabbau	0,00%	16,38%	25,52%	22,70%	0,00%
Torfabbaugeb. in Streifenabbau, Abbausegm.	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Torfabbaugeb. in Streifenabbau, Bunkerde	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Inaktives Torfabbaugebiet	0,00%	0,00%	0,00%	24,77%	20,16%
Regenerationsgebiet im Gehölzstadium	0,00%	0,00%	0,00%	0,19%	16,92%
Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium	0,00%	0,00%	0,00%	6,24%	6,24%
Regenerationsgebiet vernässt	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,12%

(Werte in % beschreiben Anteil der Teilgebiete am jeweiligen Gesamtgebiet)

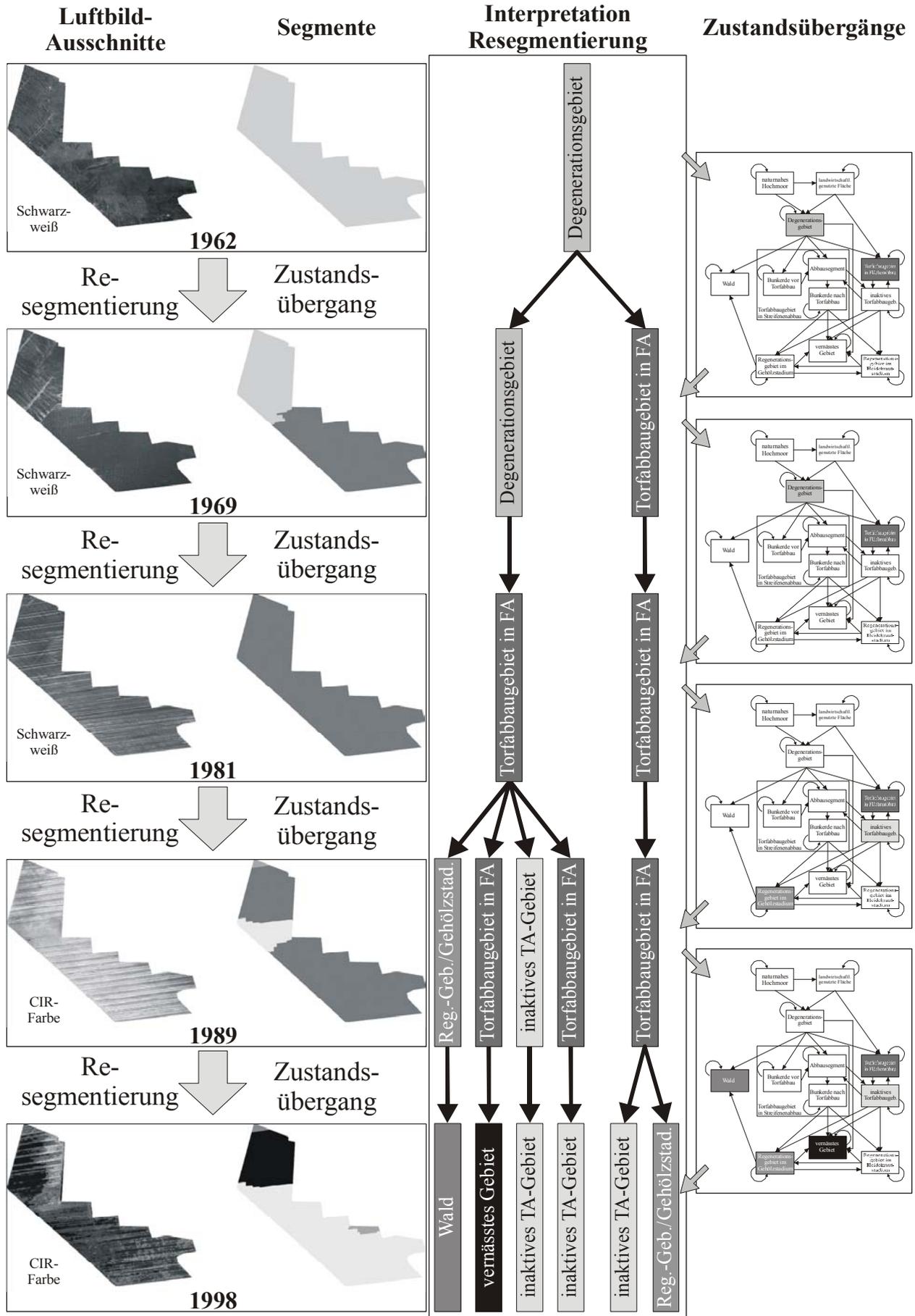


Abbildung 45: Darstellung der Zustandsübergänge anhand eines Segementes

Zur Interpretation der Aufnahme aus 1998 (Abbildung 44) erfolgt in Segment Nr. 12 eine Resegmentierung. Die vorher als *Torfabbaugebiet* interpretierten Segmente wurden für diesen Zeitpunkt als *vernässtes Regenerationsgebiet*, als *inaktives Torfabbaugebiet* oder für einen kleinen Teil (Segment Nr. 16) als *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium* interpretiert. Einige *Degenerationsgebiete* änderten ihren Zustand direkt zu *Wald* bzw. zum *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium*.

In bis Tabelle 5 sind für alle betrachteten Zeitpunkte der beiden Bildfolgen 1 und 2 einige Angaben zur Interpretation dargestellt. Die Zeile *Resegmentiert* gibt an, wie viele neue Segmente durch die Resegmentierung bzw. Initialsegmentierung am Anfang des jeweiligen Zeitpunktes entstanden sind. Die Zeile *Zustandsveränderungen gegenüber vorher* gibt an, wie viele Segmente ihren Zustand gegenüber dem vorherigen Zeitpunkt verändert haben. Die Anzahl der *bearbeiteten Segmente* ist in einigen Fällen niedriger als die *Gesamtzahl der Segmente*, da durch das Fehlen einiger Bereiche in den Testbildern die entsprechenden Segmente nicht bearbeitet werden konnten. Sind derartige Segmente jedoch in den vorangegangenen Zeitpunkten bereits interpretiert worden, tauchen sie in der *Gesamtzahl der Segmente* auf.

Aus den Tabellen ist zu erkennen, dass für beide Bildfolgen in den Bildern der ersten Zeitpunkte *Degenerationsgebiete* den größten Gebietsanteil ausmachen. Im temporalen Verlauf sank der Anteil der *Degenerationsgebiete*. Es ist zu beobachten, dass in den meisten Fällen zunächst eine Umwandlung in *Torfabbaugebiete* erfolgte und danach Übergänge zu anderen Zuständen. Dies entspricht dem temporalen Wissen, das im Zustandsübergangsdiagramm beschrieben ist.

In Abbildung 45 ist für ein Segment aus Bildfolge 2 der Verlauf der multitemporalen Interpretation dargestellt worden. Dabei ist in der rechten Spalte der Abbildung markiert, welche Übergänge im Zustandsübergangsdiagramm (siehe Abbildung 30) zum jeweiligen Wechsel der Zeitpunkte tatsächlich stattgefunden haben. In der mittleren Spalte ist zudem der Verlauf der Resegmentierung dargestellt.

4.3.6 Bewertung der Ergebnisse

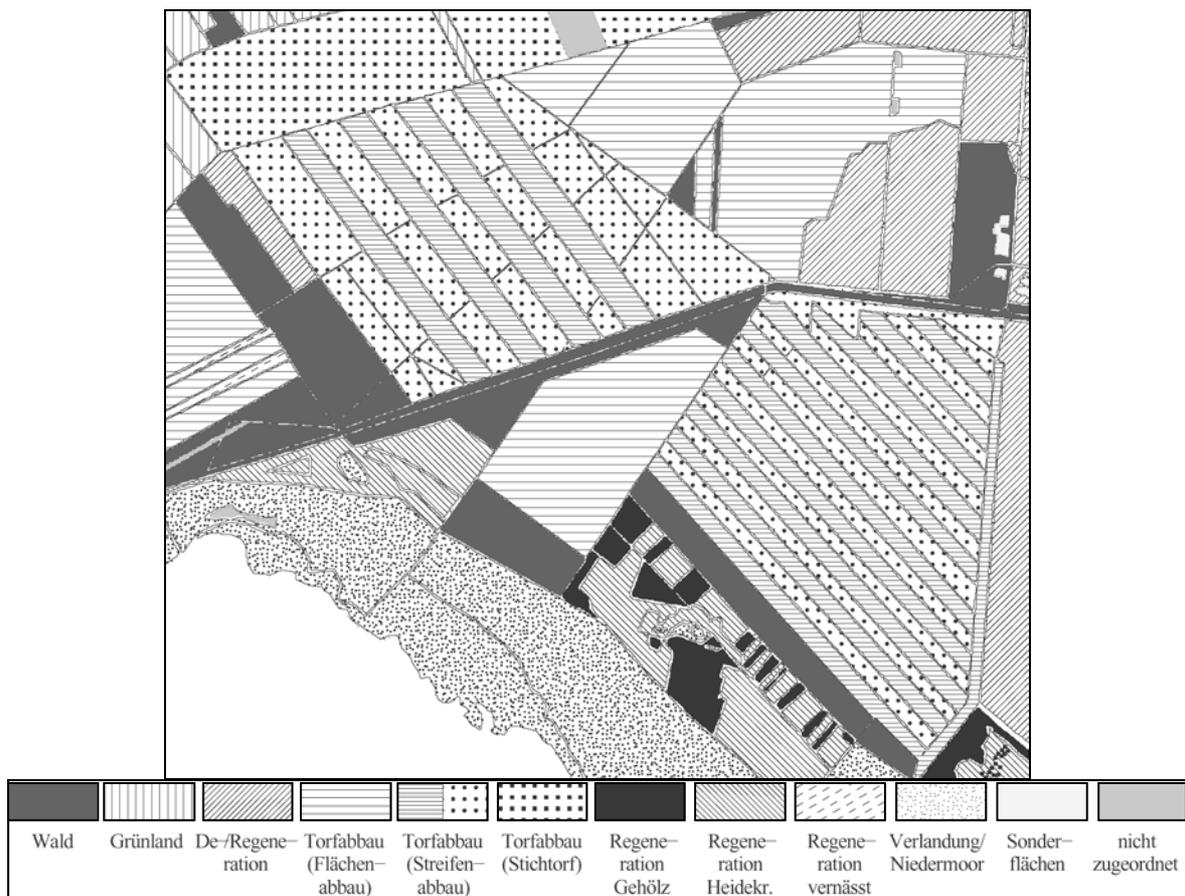


Abbildung 46: Manuelle Interpretation des Testgebietes für Bildfolge1 1998

Die Bewertung soll zunächst für Bildfolge 1 und 2 getrennt erfolgen.

Bildfolge 1

Zur Bewertung der Ergebnisse aus dem Jahr 1998 wird eine manuelle Interpretation auf Basis von [68] verwendet, die einerseits auf der Auswertung der hier verwendeten CIR-Luftbilder beruht, andererseits durch Geländebegehungen verifiziert wurde. Sie ist in Abbildung 46 dargestellt.

Die manuelle Interpretation wurde mit der automatischen verglichen. In diesen Vergleich muss einbezogen werden, dass die automatische Interpretation für den ersten Zeitpunkt von einer Segmentierung basierend auf Geo-Daten ausgeht und für die darauffolgenden in vorgegebener Weise Resegmentierungen durchführt. Dagegen basieren die Segmente der manuellen Interpretation auf Geländebegehungen. Ein Vergleich zeigt, dass die Segmentgrenzen in den meisten Bereichen gut übereinstimmen. Der Grund der Abweichung in einigen Bereichen kann beispielsweise darin liegen, dass kleine Strukturen, die aus Sicht des Vegetationsschutzes von Bedeutung sind, als Einzelsegmente aufgenommen worden sind, während sie in der automatischen Interpretation aufgrund ihrer Größe nicht resegmentiert wurden. Wegen der Abweichungen erfolgte der Vergleich visuell. Es wurde für die Segmente der automatischen Interpretation verifiziert, welche manuelle Interpretationsklasse den größten Anteil einnimmt. Das Ergebnis des Vergleiches ist in Abbildung 47 dargestellt.

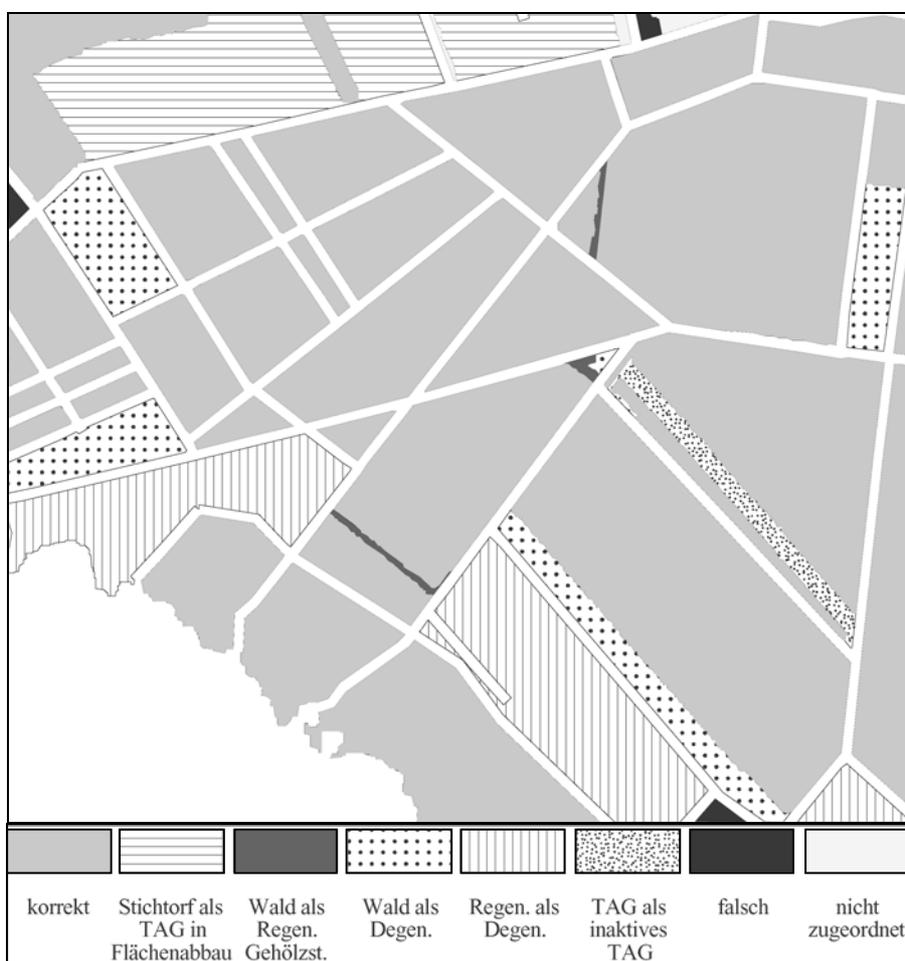


Abbildung 47: Vergleich zwischen autom. Interpretation und manueller Auswertung für Bildfolge 1 1998

Als korrekt eingeschätzt wurden die Segmente der automatischen Interpretation, wenn

- die Klassen in beiden Interpretationen übereinstimmen
- *Bunkerde* als *Degenerationsgebiet* klassifiziert wurde
- *De-/Regenerationsgebiet* als *inaktives Torfabbaugebiet* klassifiziert wurde
- *Verlandungs- und Niedermoorflächen* als *Degenerationsgebiete* eingestuft wurden

Für 1998 ergab sich folgendes Ergebnis:

- Einige Gebiete wurden als *Degenerationsgebiet* klassifiziert, obwohl sie sich in der manuellen Auswertung als *Wald* darstellten. Der Übergang vom *Degenerationsgebiet* zu *Wald*, der im Zustandsübergangsdiagramm (Abbildung 30) modelliert ist, findet fließend statt. Ab welcher *Gehölzdichte* das Gebiet als *Wald* bezeichnet wird, kann auch von Auswerter zu Auswerter verschieden sein. Daher ist diese Zuordnung nicht als falsch einzuordnen. Genauso verhält es sich mit der Klasse *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium*.
- Gebiete in *Stichtorfabbau* wurden in der automatischen Interpretation als *Torfabbaugebiete (TAG) in Flächenabbau* klassifiziert. Dies entspricht der Erwartung (siehe Definition Abschnitt 4.3.1.2), da der *Stichtorfabbau* nicht separat modelliert wurde.
- In drei Segmenten wurden *Regenerationsgebiete* als *Degenerationsgebiete* eingestuft. Die Tatsache, dass es sich bei den Gebieten um *Regenerationsgebiete* handelt, konnte aus den vorliegenden Bilddaten nicht ermittelt werden, da kein *Torfabbau* betrachtet wurde und aufgrund dessen das temporale Wissen nicht vollständig war.
- In einem Fall wurde ein *Torfabbaugebiet in Streifenmethode* als *inaktives Torfabbaugebiet* eingestuft, da keine Streifenstruktur detektiert wurde, die aufgrund der verwendeten Wissensbasis die Voraussetzung zur Erkennung von *Torfabbau* darstellt.
- Drei weitere kleine Segmente, die am Rand der Bildausschnitte liegen, sind falsch klassifiziert worden.

Für die Auswertung der übrigen Zeitpunkte wurde eine visuelle Verifikation mit Experten, die in dem Gebiet des Toten Moores über jahrelange Erfahrung verfügen, durchgeführt. Für 1975 – 1989 ergab sich dabei folgendes Ergebnis:

- Der Streifen, der sich aus den Segmenten Nr.1 und dem westlichen Teil von Nr.2 zusammensetzt, besteht aus *Verlandungsflächen* und *Niedermoor*. Wie oben erwähnt sind diese Klassen nicht separat modelliert. Das System erkennt sie als *Degenerationsgebiete*. Dies gilt für alle Zeitpunkte.
- Auf den Segmenten Nr.3 wurde wahrscheinlich schon seit 1975 bis 1989 Torf im Stichtorfverfahren abgebaut. Dies geschah aber sehr selektiv, unregelmäßig und nicht flächendeckend. Aus dem Grunde haben sich über den größten Teil der Fläche keine charakteristischen Strukturen ergeben, nur in sehr kleinen Regionen. Dies wurde in der Interpretation nicht erkannt, da derartiger *Torfabbau* nicht modelliert wurde. Dies gilt für alle Zeitpunkte bis 1989. Auf allen übrigen Flächen des Jahres 1975, außer den Segmenten Nr.4, die als *Degenerationsgebiet* eingestuft wurden, kann sektionsweise *Torfabbau* betrieben worden sein.
- Bei den Segmenten Nr.5 könnte es sich für die Jahre 1975 bis 1989 auch um *Degenerationsgebiete* handeln.
- Für das Jahr 1986 wurde Segment Nr.6 falsch erkannt. Es fand definitiv *Torfabbau* auf dem größten Teil des Gebietes statt. Das System konnte die parallelen Linien nur unzureichend detektieren und aufgrund dessen keine Resegmentierung durchführen. Dies führte dazu, dass das Gebiet als Ganzes betrachtet der Klasse *Degenerationsgebiet* zugeordnet wurde.
- Die Segmente Nr.7 waren wahrscheinlich aktiv, insbesondere das westliche Segment.

Bildfolge 2

Da für das Gebiet der Bildfolge 2 nur teilweise eine manuelle Interpretation [68] vorlag, erfolgte die Auswertung dieser Bildfolge ebenfalls basierend auf einer visuellen Verifikation mit Experten (siehe oben) unter Einbeziehung der Teilinterpretation aus [68]. Die Auswertung für alle Zeitpunkte führte zu folgenden Ergebnissen:

- Die *Torfabbaugebiete* sind sowohl in den Schwarzweiß- als auch in den CIR-Bildern zuverlässig erkannt worden. Die Gebietsabgrenzungen der *Torfabbaugebiete* durch die Resegmentierungen führten ebenfalls zu korrekten Ergebnissen.
- Segment Nr. 10 ist im Bild des Jahres 1962 aufgrund der Textur, die keine ausreichend hohe Homogenität aufwies, als *Degenerationsgebiet* interpretiert worden, nicht korrekterweise als *Grünland*. Fehlende temporale Historie und die Unsicherheit der Schwarzweißbilder gegenüber Farb-Aufnahmen führte zu dieser falschen Interpretation, welche sich für die weiteren Zeitpunkte fortpflanzte. Die Interpretation des Segmentes für den Zeitpunkt 1998 als *Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium* ist somit ebenfalls falsch.
- Für das Jahr 1962 wurden die Segmente Nr. 9 als *Degenerationsgebiet* interpretiert. Obwohl die Zuordnung bei einer visuellen Überprüfung der Struktur mindestens für zwei der vier Segmente als korrekt angesehen werden kann, ist sie dennoch nicht richtig und wirkt sich auf den weiteren Verlauf der Interpretation aus. Die durchgeführte Interpretation erfolgte im Kontext eines Mooregebietes. Da sich jedoch diese Segmente

außerhalb des Mooregebietes befinden (die Straße, die die Segmente nach Südwesten hin begrenzt, gilt als Moorgrenze), ist dieser Kontext für das betreffende Gebiet nicht gegeben. Daher stimmt für das Gebiet das a priori Wissen (mono- und multitemporal) und die Resegmentierungsstrategie nicht. So trifft beispielsweise die gemachte Annahme, dass Segmente, die nicht eindeutig zugewiesen werden können, mit hoher Wahrscheinlichkeit *Degenerationsgebiete* sind, auch nicht zu. Im weiteren Verlauf der multitemporalen Interpretation kann daher bis hin zum Zeitpunkt 1998 beobachtet werden, dass die Gebiete falsch interpretiert worden sind.

- Die für das Jahr 1998 als *Wald* erkannten Gebiete waren korrekt.
- Für den Zeitpunkt 1998 ist Segment Nr. 13 korrekt als *vernässtes Gebiet* erkannt worden. Entscheidend für die Interpretation war die detektierte Wasserfläche, die einen großen Anteil an der Gesamtfläche des Segmentes aufwies.
- Die Interpretation des Segmentes Nr. 14 für 1998 als *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium* ist vertretbar, insbesondere vor dem Hintergrund, dass einige Bereiche frei von Bäumen sind. Im südwestlichen Bereich des Segmentes befindet sich ein *vernässtes Gebiet*. Dieses ist jedoch im Vergleich zur Gesamtfläche des Segmentes derart klein, dass es nicht als solches interpretiert worden ist. Die Region im Nordwesten des Segmentes ist ein *Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium*. Dieses Gebiet wurde jedoch nicht resegmentiert und aufgrund dessen nicht als *Regenerationsgebiet im Heidekrautstadium* interpretiert worden.
- Für den Zeitpunkt 1998 wurde Segment Nr. 15 korrekt als *inaktives Torfabbaugebiet* erkannt. Das Segment Nr. 16, das vom vorigen Segment abgetrennt und als *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium* interpretiert wurde, wäre bei einer manuellen Interpretation nicht resegmentiert worden. Die Interpretation wäre somit ebenfalls *inaktives Torfabbaugebiet*.

Insgesamt ergab sich folgendes Ergebnis:

- Die *Torfabbaugebiete* konnten, wenn sie flächenhaft und gleichmäßig über größere Regionen vorhanden waren, zum allergrößten Teil erkannt werden. Nur für einen Zeitpunkt (1986) in der Bildfolge 1 konnte aufgrund der undeutlichen Erkennbarkeit der Linienstrukturen keine Resegmentierung durchgeführt und aufgrund dessen die Zuordnung nicht korrekt vorgenommen werden. Zudem wurde das *Torfabbaugebiet*, wenn zu einem Zeitpunkt bereits erkannt, bei undeutlicher Erkennbarkeit der Klasse *inaktives Torfabbaugebiet* zugeordnet, aus dem dann wieder ein aktives folgen konnte. Aus dem Grund kann die Klasse *inaktives Torfabbaugebiet* als ein Puffer für Fehlerkennungen gesehen werden. Dies gilt ebenso für den *Torfabbau in Streifenmethode*. Die angrenzende *Bunkerde* wurde in einigen Fällen als *Degenerationsgebiet* erkannt, weil die vorgegebene *Streifenform* nicht gegeben war. Dies ist jedoch nicht als Fehler zu sehen, da *Bunkerde* auch *Degenerationsgebiet* ist, jedoch im Kontext mit den *Abbausegmenten* der Klasse *Bunkerde* zugeordnet wird.
- Wie in der Definition der Klasse *Torfabbaugebiet in Flächenabbau* angegeben, wurden die Stichtorfverfahren auch dieser Klasse zugeordnet (siehe Abschnitt 4.3.1.2).
- Die *Wälder* wurden zuverlässig erkannt, *Grünland* mit einer Ausnahme ebenso.
- Die *Degenerationsgebiete* sind in den meisten Fällen korrekt erkannt worden. Tendenziell erfolgt die Zuweisung zu dieser Klasse eher zu häufig als zu selten. Dies folgt aus der Strategie, dass Gebiete, die nicht eindeutig den anderen Klassen zugewiesen werden konnten, letztlich der Klasse *Degenerationsgebiet* zugeordnet wurden. Daraus folgt, dass die meisten falschen Zuweisungen zu einer Vergrößerung der Klasse *Degenerationsgebiet* führten.
- Die *Regenerationsgebiete* wurden ebenso wie *vernässte Gebiete* zuverlässig erkannt. Die Grenze zwischen *Degenerationsgebiet* bzw. *Regenerationsgebiet im Gehölzstadium* und *Wald* kann unscharf sein. Wann ein Gebiet der einen oder anderen Klasse zugeordnet wird, ist manchmal selbst durch menschliche Auswerter nicht eindeutig festzulegen.
- Da die Wissensbasis und die Interpretationsstrategien für das Mooregebiet ausgelegt worden sind, führt eine Anwendung der Interpretation außerhalb eines Mooregebietes zu falschen Ergebnissen. Dies hat sich in einem Teilgebiet der Bildfolge 2 gezeigt.

5 *Bewertung des Ansatzes und der Ergebnisse der Arbeit*

Die Bewertung des hier beschriebenen Verfahrens kann auf zweierlei Art vorgenommen werden: Zum einen kann die Arbeit aus methodischer Sicht betrachtet werden. Welche Methoden und Strategien sind entwickelt und eingesetzt worden, um das Ziel einer gegenüber bisherigen Verfahren verbesserten automatischen multitemporalen Interpretation zu erreichen. Die Anwendung dient bei dieser Betrachtungsweise primär der Demonstration der Methoden und Strategien. Zum anderen kann die Bewertung aus der Sicht der Anwendung durchgeführt werden: Wie nützlich ist das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Interpretationssystem für die potenziellen Nutzer? Nachfolgend soll auf beide Betrachtungsweisen eingegangen werden.

Die in dieser Arbeit verwendete Strategie nutzt Semantische Netze als eine explizite Beschreibungsform zur Wissensrepräsentation. Hierdurch wird ein zentraler Punkt in der Entwicklung von Bildanalyse-Systemen, die Implementierung des Expertenwissens in die Systeme, erheblich vereinfacht, da die Repräsentationsform wesentlich näher an der allgemeinen hochsprachlichen Beschreibung von Objekten und an der Strategie, Objekte zu erkennen, liegt.

Darauf basierend ist für das komplexe Problem der automatischen Interpretation von industriell genutzten Mooregebieten erfolgreich ein Interpretationssystem entwickelt worden. Die verwendete Strategie nutzt Interpretationshinweise innerhalb von vorgegebenen Segmentgrenzen. Daher ist es möglich, Segmente, die radiometrisch und textuell inhomogen sind, zu interpretieren, indem Merkmale gesucht werden, die innerhalb der jeweiligen Segmente für eine bestimmte Bedeutungszuweisung vorhanden sein müssen. Die Merkmale leiten sich dabei aus Beschreibungsformen ab, die hochsprachlich zur Charakterisierung von Flächen verwendet werden, wie z.B. die Beschreibung „unregelmäßige Struktur“. Die verwendeten strukturellen Merkmale können dabei sowohl die Textur als auch die Farbe beschreiben. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich diese Art der Beschreibung gut zur Interpretation von Mooregebieten eignet. Besonders in inhomogenen Regionen, wie sie in Mooregebieten auch vorkommen (z.B. Degenerationsgebiete), kann durch eine derartige Beschreibung erfolgreich eine automatische Interpretation durchgeführt werden.

Eine Stärke der verwendeten Strategie zeigt sich bei der Interpretation von Schwarzweißluftbildern: Die Ergebnisse der ersten drei Zeitpunkte beider Bildfolgen zeigen, dass eine Interpretation auch ohne die Nutzung von Farbinformationen für mehrere Objektklassen erfolgreich durchgeführt werden kann. Bislang waren zur automatischen Interpretation von Vegetationsgebieten Farbinformationen unvermeidbar.

Neben dem nichttemporalen Wissen wurde zusätzlich temporales Wissen über Mooregebiete genutzt. Hierfür wurde ein neuartiges Konzept zur Beschreibung und Nutzung von temporalem Wissen verwendet. Eine Zielsetzung dieser Arbeit war es, eine multitemporale Interpretation eines bestimmten Gebietes durchzuführen. Hierzu wurde nicht die bislang häufig verwendete Strategie genutzt, die Bilder jedes Zeitpunktes in gleicher Weise unabhängig von den restlichen zu interpretieren. Stattdessen wurde die Interpretation eines Zeitpunktes als Vorwissen in die des nächsten mit eingebracht. Als Vorwissen wurde dabei beschrieben, welche Zustände sich mit hoher Wahrscheinlichkeit in welche anderen verändern können. Zur Beschreibung dieser Zustandsübergänge wurden Zustandsübergangsdiagramme verwendet, die in die Semantischen Netze integriert wurden. Mit Hilfe dieses temporalen Wissens kann vorab für die Interpretation eines bestimmten Folgezeitpunktes der Suchbereich eingeschränkt werden und auf diese Weise auch die Fehlerwahrscheinlichkeit. Bieten beispielsweise die Bilddaten eines Zeitpunktes nicht genügend Informationen zur Interpretation, kann das temporale Vorwissen entscheidend sein. Dies gilt im besonderen Maße für die Nutzung von Schwarzweißluftbildern, die durch die fehlenden Farbinformationen eine höhere Unsicherheit bei der Interpretation aufweisen.

Soll beispielsweise im Schwarzweißluftbild eines Mooregebietes ein homogenes Segment interpretiert werden, gibt es für die Lösung mehrere Möglichkeiten. Zum einen kann es sich um Grünland handeln, zum anderen aber auch um ein inaktives Torfabbaugebiet. Um eine Entscheidung zwischen diesen Möglichkeiten treffen zu können, benötigte man die Farbinformationen. Aufgrund des temporalen Wissens kann jedoch darauf verzichtet werden: Wenn in den Interpretationsschritten vorher schon Torfabbau detektiert wurde, wird das System aufgrund der temporalen Wissensbasis eine Entscheidung zugunsten des inaktiven Torfabbaugebietes treffen. Dies führt dazu, dass durch die Nutzung des temporalen Wissens in Schwarzweißbildern die Unterscheidung zusätzlicher Klassen ermöglicht wird. Auch in Farbbildern führt die Nutzung des temporalen Wissens dazu, dass mehr Klassen unterschieden werden können. So können beispielsweise im untersuchten Mooregebiet die Klassen De- und Regenerationsgebiet, die in Luftbildern eines Zeitpunktes sehr ähnlich aussehen, voneinander unterschieden werden.

Das vorgestellte Verfahren bietet einen vollautomatischen Ansatz zur Interpretation der Mooregebiete. Als Ausgangspunkt werden dabei Geo-Daten zur Initialsegmentierung verwendet. Dies könnte als Nachteil gelten, da dieser Ansatz nur in Gebieten funktioniert, für die die jeweiligen Geo-Daten existieren. Die benötigten Geo-Daten, die sich im Wesentlichen aus den linienförmigen Objektarten Straße, Weg und Graben zusammensetzen, könnten jedoch auch

durch spezielle Objektextraktions-Verfahren direkt aus den Fernerkundungsdaten extrahiert werden. Die Arbeiten in diesem Bereich an unterschiedlichen Forschungseinrichtungen sind bereits im fortgeschrittenen Stadium. Wird eine derartige Objektextraktion der beschriebenen Interpretation vorangestellt, wäre das Verfahren auch unabhängig von Geo-Daten.

Andererseits führt der vollautomatische Ansatz nicht immer zur bestmöglichen Lösung. Das hier vorgestellte Verfahren geht von einer Initialsegmentierung aus und führt darauf basierend eine Interpretation durch. Die ermittelten Segmentgrenzen und die Interpretation bilden die Basis für die folgenden Interpretationen. Da die hier verwendeten Gebiete relativ inhomogen und stark strukturiert sind, wurde die Segmentierung so ausgelegt, dass eher eine Tendenz zur Untersegmentierung besteht. Dies bedeutet, dass das automatische System möglicherweise in einigen Regionen, in denen ein Auswerter manuell eine Unterteilung durchführen würde, diese unterlässt. Diese Unterteilung könnte jedoch für eine korrekte Interpretation von Bedeutung sein, da sonst im Segment mehrere Klassen zusammenfallen würden. Dies würde die Interpretation des ersten Zeitpunktes fehleranfälliger machen. Da sie jedoch die Grundlage für alle folgenden Interpretationen bildet, kann sich eine Fehlinterpretation fortpflanzen. Aus dem Grunde wäre es für das Verfahren sinnvoll, die Initialsegmentierung manuell durchzuführen oder zumindest manuell zu überprüfen.

Ein weiterer Grund für die erhöhte Fehleranfälligkeit der Interpretation des ersten Zeitpunktes gegenüber den übrigen ist die fehlende Historie: Da keine vergangenen Interpretationszeitpunkte vorliegen, gibt es auch keine Einschränkungen des Suchbereiches für die Interpretation. Deshalb kann es sinnvoll sein, diese auch manuell durchzuführen oder die automatisch durchgeführte manuell zu verifizieren. Da Interpretationen mit Luftbildern ohne Farbinformationen fehleranfälliger sind als Interpretationen mit Farbe, ist es sinnvoll, für den ersten Zeitpunkt Luftbilder mit Farbinformationen zu verwenden.

Ein Nachteil der verwendeten Monitoring-Strategie ist die Tatsache, dass nachträglich die Interpretationen zurückliegender Zeitpunkte nicht korrigiert werden können, auch wenn sich aus den Ergebnissen für die neuen Zeitpunkte Fehlinterpretationen der zurückliegenden zeigen.

Das entwickelte Verfahren lässt sich voraussichtlich gut auf andere Bereiche übertragen. Denkbar wäre beispielsweise die Entwicklung eines Systems zum automatischen Monitoring von Ackerflächen aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten. Da sich die jahreszeitlichen Veränderungen der Felder vorhersagen lassen und ausgehend von der aktuell angebauten Frucht in der Regel die möglichen Früchte für die Folgejahre auch einschränken lassen, bietet die in dieser Arbeit geschaffene Möglichkeit, Zustandsübergänge zu modellieren und für das System nutzbar zu machen, zusammen mit der Möglichkeit, Strukturen zu erkennen, ein mächtiges Werkzeug für eine robustere und genauere Interpretation.

Aus der Sicht der Anwendung zeigen die Ergebnisse, dass der vorgestellte Ansatz geeignet ist, erfolgreich eine Interpretation von Mooregebieten durchzuführen. Die verwendete Bodenpixelgröße von 0.5m/Pixel bei den Luftbildern hat sich als ausreichend zur Erkennung der gesuchten Strukturen erwiesen. Der Ansatz bietet im Vergleich zu bisher verwendeten Verfahren mehrere Vorteile. Zum einen ist er nicht auf Farbbilder angewiesen. Auch unter alleiniger Verwendung von Texturinformationen erzielt das Verfahren im Mooregebiet in den meisten Fällen korrekte Ergebnisse. Dieser Punkt erhält vor dem Hintergrund, dass die meisten Bildflüge in Deutschland immer noch in Schwarzweiß durchgeführt werden, eine größere Bedeutung. Obwohl die Schwarzweißbildflüge nicht zur Interpretation von Vegetationsflächen gedacht sind, könnten sie mit dem hier vorgestellten Verfahren dafür eingesetzt werden. Es müssten nicht zusätzliche Bildflüge in Farbe durchgeführt werden. Einige Ämter für Naturschutz, die auch für den Erhalt der Mooregebiete verantwortlich sind, verfügen über ein sehr eingeschränktes Haushalts-Budget und können daher nur sehr selten oder gar nicht eigene Befliegungen in Auftrag geben. Die Nutzung von schon vorhandenen Bilddaten erhält somit eine größere Bedeutung.

Die bislang für Vegetationsgebiete verwendeten multispektralen Klassifikationsverfahren neigen zu einer starken Übersegmentierung. Obwohl der gewünschte Grad der Segmentierung immer von der jeweiligen Fragestellung abhängt, zeigen die Spezifikationen mehrerer Kartierschlüssel im Bereich von Biotopen, dass häufig Regionen in ihrer gesamten Struktur als ein Segment erhalten bleiben sollen. Der vorgestellte Ansatz, eine Interpretation innerhalb vorgegebener Segmentgrenzen durchzuführen und strukturelle Merkmale zu verwenden, erfüllt diese Vorgabe besser als die bisherigen Verfahren.

Ein Vergleich der Resegmentierungen mit und ohne Farbinformationen im vorgestellten Ansatz zeigt, dass sich der Grad der Resegmentierung bei Verwendung von Farbbildern und von Schwarzweißbildern unterscheidet. Bei Farbbildern werden mehr Resegmentierungen zugelassen. Dies lässt sich jedoch mit der größeren Unsicherheit bei Verwendung von Schwarzweißbildern begründen, was schärfere Bedingungen für die Resegmentierung zur Folge hat.

Im Bereich des Naturschutzes ist häufig die Beobachtung von Landschaftsveränderungen von Interesse. So werden beispielsweise in Mooregebieten Maßnahmen zur Renaturierung durchgeführt, deren Auswirkungen in zeitlichen Abständen kontrolliert werden müssen. Für derartige Fälle reichen Interpretationen einzelner Zeitpunkte nicht aus. Auch eine Aneinanderreihung voneinander unabhängiger Interpretationen einzelner Zeitpunkte ist nur bedingt geeignet. Hier zeigt sich eine weitere Stärke des vorgestellten Ansatzes. Durch die Verwendung temporalen Wissens können die beobachteten Gebiete gezielt auf bestimmte Veränderungen hin überprüft werden. Wenn beispielsweise im Mooregebiet eine Renaturierungsmaßnahme zur Wiedervernässung durch Zuschütten von Gräben durchgeführt wurde, kann mit Hilfe des hier vorgestellten Ansatzes überprüft werden, ob im zeitlichen Verlauf Baumbestände, die sich in dem Gebiet befanden, nach und nach absterben. Mit Hilfe der entwickelten Anwendung hätte der Naturschützer ein hilfreiches Werkzeug, um dynamische Prozesse zu beobachten.

Das Tote Moor, das als Testgebiet für das Verfahren diente, ist in seiner Größe für die Naturschützer auch ohne automatische Interpretationsverfahren noch zu handhaben. Obwohl das Verfahren eine Arbeitserleichterung bringen würde, wäre sie für diese Größe des Moores noch nicht zwingend erforderlich. Anders verhält es sich bei relativ großen Flächen, wie sie beispielsweise in Kanada vorkommen. In derartigen Regionen ist eine manuelle Überwachung sehr personal- und kostenintensiv und der Einsatz eines solchen Systems sinnvoll.

Verbesserungen des Verfahrens lassen sich dadurch erzielen, dass die verwendete mono- und multitemporale Wissensbasis noch stärker an das Expertenwissen angepasst wird. Obwohl die aktuelle Wissensbasis bereits sehr viel Expertenwissen enthält und für die Interpretation des Testgebietes zu guten Ergebnissen führt, könnte zur Berücksichtigung von Spezialfällen eine Erweiterung der Wissensbasis notwendig sein. Bei einer Übertragung des Verfahrens auf andere Gebiete müsste die Wissensbasis eventuell verändert werden. So ist es möglich, dass in anderen Regionen bzw. anderen Ländern andere gesetzliche Grundlagen zur Behandlung der Gebiete existieren, die bei Relevanz in die Wissensbasis übernommen werden müssten. Hierbei sollte immer überprüft werden, welche Wissensbasis für die jeweilige Fragestellung notwendig ist.

Potenzial zur Weiterentwicklung bietet zudem die Resegmentierung. Da sie für jede Klasse unterschiedlich sein kann, muss von Fall zu Fall überprüft werden, welche Strategie sich am besten zur Resegmentierung welcher Klasse eignet. Zur Bestimmung der Segmentgrenzen mehrerer Klassen könnte die Verwendung von Aktiven Kontur Modellen sinnvoll sein.

Obwohl bei der Realisierung der verwendeten Bildverarbeitungsoperatoren angestrebt wurde, möglichst wenige frei einstellbare Parameter zuzulassen und auf diese Weise die Operatoren möglichst universell einsetzbar zu gestalten, existieren trotzdem noch einige Parameter, die bei stark verschiedenartigen Bilddaten angepasst werden müssen. Um diese Anpassungen automatisch durchführen zu können und so den Automationsgrad des Systems weiter zu steigern, bieten automatische Adaptionssysteme vielversprechende Ansätze zur Lösung dieses Problems. Die Integration derartiger Adaptionssysteme könnte jeweils zu einer Anpassung der Parameter an die verwendeten Bilddaten führen und die Effizienz der Operatoren steigern.

Eine Genauigkeitsaussage des Systems, die Auskunft darüber gibt, wie gut oder wie sicher die Ergebnisse sind, wäre vor allem aus der Sicht der Anwender von Interesse. Es wäre zu untersuchen, auf welche Weise sich ein derartiges Bewertungssystem sinnvoll in das verwendete System integrieren lässt.

Die Nutzung von Zusatzinformationen könnte ebenfalls zu einer Verbesserung der Interpretation führen. So ließen sich bestimmte Veränderungen im Mooregebiet besser voraussagen, wenn beispielsweise die jeweilige Höhe des Grundwasserspiegels bekannt wäre. Zusammen mit Informationen über die geomorphologischen Gegebenheiten könnten so Auswirkungen bestimmter Maßnahmen, wie beispielsweise das Schließen von Entwässerungsgräben, besser beurteilt werden. Auch Auswirkungen bestimmter Maßnahmen oder Entwicklungen eines Segmentes auf Nachbarsegmente könnten besser präzisiert werden.

6 Literatur

- [1] A&M GESELLSCHAFT FÜR UMWELTMONITORING UND FERNERKUNDUNG, 31.05.2000: „Der Einsatz von Luftbildern in der Landschaftsplanung“, Vortrag am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover
- [2] ADV, 1989: „ATKIS-Gesamtdokumentation“, Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), *Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen*, Bonn
- [3] ALBERTZ, J., 1991: „Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern“, *Wissenschaftliche Buchgesellschaft*, Darmstadt, 204 S.
- [4] BACHER, U., MAYER, H., 2000: „Automatic extraction of trees in urban areas from aerial imagery“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part 3A, Amsterdam, S. 51-57
- [5] BÄHR, H.-P., VÖGTLE, T. (Editors), 1999: „GIS for Environmental Monitoring“, *E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller)*, Stuttgart, 360 S.
- [6] BÄHR, H.-P., VÖGTLE, T., 1991: „Digitale Bildverarbeitung – Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung“, 2. Auflage, *Wichmann*, Karlsruhe, 328 S.
- [7] BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W., EBNER, H., 1999: „Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping, and Context“, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(7), S. 777–785
- [8] BORGEFORS, G., BRANDTBERG, T., WALTER, F., 1999: „Forest parameter extraction from airborne sensors“, in: IAPRS, Vol. 32, Part 3-2W5 “Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery”, Munich, September, S. 151-158
- [9] BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, 1995: „Systematik der Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung (Kartieranleitung)“, *Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz*, Heft 45, Bonn - Bad Godesberg, 153 S.
- [10] BUSCH, A., 1996: „A common framework for the extraction of lines and edges“. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31, Part B3, Wien, S. 88-93
- [11] CANNY, J., 1986: „A computational approach to edge detection“, *IEEE Trans. PAMI-8*, S. 679-698
- [12] CLEMENT, V., GIRAUDON, G., HOUZELLE, S., SADAKLY, F., 1993: „Interpretation of Remotely Sensed Images in a Context of Multisensor Fusion Using a Multispecialist Architecture“, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, No 4, S. 779-791
- [13] DE GUNST, M., VOSELNAN, G., 1997: „A Semantic Road Model for Aerial Image Interpretation“. In: *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, *Birkhäuser Verlag*, Basel, Schweiz, S. 107-122
- [14] EGENHOFER, M. J., FRANZOSA, R. D., 1994: „On the Equivalence of Topological Relations“, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 8, No. 6, S. 133-152
- [15] EIGNER J., SCHMATZLER E., 1991: „Handbuch des Hochmoorschutzes - Bedeutung, Pflege, Entwicklung“, *Kilda-Verlag*, Greven, 158 S.
- [16] FISCHLER, M. A., TENENBAUM, J. M., WOLF, H.C., 1981: „Detection of Roads and Linear Structures in Low-Resolution Aerial Imagery Using a Multisource Knowledge Integration Technique“, *Computer Graphics and Image Processing*, 15, S. 201-223
- [17] FÖRSTNER W., LIEDTKE C.-E., BÜCKNER J. (Eds.), 1999: Proceedings, Workshop on "Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps" (SMATI'99)
- [18] FUA, P., 1996: „Model-based optimization: Accurate and consistent site modelling“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31, Part B3, Amsterdam, S. 222-233.
- [19] GÖTTLICH, K., 1990: „Moor und Torfkunde“, *Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller)*, Stuttgart, 527 S.
- [20] GOUGEON, F., 1995: „A crown following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images“, *Can. J. Rem. Sens.*21(3), S. 274-284

- [21] GROWE, S., 2001: „Wissensbasierte Interpretation multitemporaler Luftbilder“, Dissertation, Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover, *Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 10, VDI-Verlag, Düsseldorf
- [22] GROWE S., LIEDTKE C.-E., PAKZAD K., 1999: „A Knowledge Based Approach to Sensor Fusion applied to Multisensory and Multitemporal Imagery“, International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 21.-24. Juni 1999, Ottawa, Ontario, Canada, S. 589-596
- [23] GRÜNREICH, D., 1992: „ATKIS – A Topographic Information System as a Basis for a GIS and Digital Cartography in West Germany“, *Geol. Jb.*, Vol. A122, Hannover, S. 207-215
- [24] GÜLCH, E., 2000: “Digital systems for automated cartographic feature extraction”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part 2, Amsterdam, S. 241-256
- [25] GÜLCH, E., 1996: “Deformable Models as a Photogrammetric Measurement Tool – Potential and Problems”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31, Part B3, Wien, S. 279-284
- [26] HABERÄCKER, P., 1995: „Praxis der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung“, *Carl Hanser Verlag*, München, Wien, 370 S.
- [27] HABERÄCKER, P., 1991: „Digitale Bildverarbeitung“, 4. Auflage, *Carl Hanser Verlag*, München, Wien, 404 S.
- [28] HAKE, G., GRÜNREICH, D., 1994: „Kartographie“, 7. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 599 S.
- [29] HARALICK, R. M., SHAPIRO, G. S., 1992: „Computer and Robot Vision – Volume I“, *Addison-Wesley*, 672 S.
- [30] HARALICK, R. M., SHAPIRO, G. S., 1993: „Computer and Robot Vision – Volume II“, *Addison-Wesley*, 630 S.
- [31] HENRICSSON, O., 1996: „Analysis of Images using Color Attributes and Similarity Relations“, Dissertation, No. 11663, Communication Technology Laboratory, Computer Vision Group, ETH Zürich, Schweiz
- [32] HEIPKE, C., 1995: „Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen“, Habilitation, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, *Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe C, Nr. 450, 111 S.
- [33] HEIPKE, C., 1990: „Integration von digitaler Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthophotoprojektion in der digitalen Phogrammetrie“, Dissertation, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, *Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe C, Nr. 366
- [34] HEIPKE, C., PAKZAD, K. STRAUB, B.-M., 2000: „Image Analysis for GIS Data Acquisition“, *Photogrammetric Record*, 16 (96), S. 963-985
- [35] HEIPKE, C., STRAUB, B., 1999: „Relations between Multiscale Imagery and GIS Aggregation Levels for the Automatic Extraction of Vegetation Areas“, Proceedings of ISPRS Joint Workshop „Sensors and Mapping from Space 1999“, September 27-30, Hannover
- [36] HILDEBRANDT, G., 1996: „Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie“, 1. Auflage, *H. Wichmann Verlag*, Heidelberg, 200 S.
- [37] HINZ S., BAUMGARTNER A., 2000: „Road Extraction in Urban Areas Supported by Context Objects“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part 3A, Amsterdam, S. 405-412
- [38] HUGUENIN, R. L., KARASKA, M. A., VAN BLARICOM, D., JENSEN, J., 1997: „Subpixel Classification of Bald Cypress and Tupelo Gum Trees in Thematic Mapper Imagery“, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(6), S. 717-725
- [39] JÄHNE, B., 1991: „Digitale Bildverarbeitung“, *Springer Verlag*, 337 S.
- [40] KLETTE, R., ZAMPERONI, P., 1995: „Handbuch der Operatoren für die Bildbearbeitung“, *Vieweg*, 383 S.
- [41] KONECNY, G., LEHMANN, G., 1984: „Photogrammetrie“, 4. Auflage, *Walter de Gruyer*, Berlin, New York, 392 S.
- [42] LANDKREIS HANNOVER, 1998: „Mythos Moor – Natur Geschichte Aktion“, CD-Rom, New Media Factory, Hannover
- [43] LARGOUET, C., CORDIER, M.-O., 2000: „Improving the Landcover Classification using Domain Knowledge“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part 4B, Amsterdam, S. 538-545
- [44] LGN NIEDERSACHSEN, 1997: „Top50“, CDRom
- [45] LIEDTKE, C.-E., ENDER, M., 1989: „Wissensbasierte Bildverarbeitung“, *Springer-Verlag*, Berlin, 230 S.

- [46] LILLESAND, T., KIEFER, R. W., 2000: „Remote Sensing and Image Interpretation“, Fourth Edition, *John Wiley & Sons*, New York, 724 S.
- [47] LUNETTA, R. S., ELVIDGE, C. D. (Editors), 1999: „Remote Sensing Change Detection – Environmental Monitoring Methods and Applications“, *Taylor & Francis*, London, 318 S.
- [48] MAS, J.-F., 1999: “Monitoring Land-Cover Changes: A Comparison of Change Detection Techniques”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, No. 1, S. 139-152
- [49] MATSUYAMA, T., HWANG, V.S.-S., 1990: „SIGMA: A Knowledge-Based Aerial Image Understanding System“, *Plenum Press*, New York/London, 277 S.
- [50] MAYER H., 1998: „Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern“, Habilitation, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, *Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe C, Nr. 494
- [51] MCKEOWN, D., DENLINGER, J., 1988: „Cooperative Methods For Road Tracking In Aerial Imagery“. In: *Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 662-672
- [52] MCKEOWN, D., HARVEY, W. A., MCDERMOTT, J., 1985: „Rule-Based Interpretation of Aerial Imagery“, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, Vol. 7 (5), S. 570-585
- [53] METTERNICHT, G., HONEY, F., BEESTON, G., GONZALEZ, S., 2000: „Potential of High Resolution Airborne Videography for Rapid Assessment and Monitoring of Vegetation Conditions in Agricultural Landscapes“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part 7B, Amsterdam, S. 868-875
- [54] NEUENSCHWANDER, W., FUA, P., SZÉKELY, G., KÜBLER, O., 1995: „From Ziplock Snakes to Velcro™ Surfaces“, in: *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, *Birkhäuser Verlag*, Basel, Switzerland, S. 105-114
- [55] NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM, 1997: „Umweltmonitoring von Zustand und Nutzung der Hochmoore – Auswertung der Satellitendaten für das Niedersächsische Moorschutzprogramm“, Hannover, 159 S.
- [56] NIEMANN, H., SAGERER, G., SCHRÖDER, S., KUMMERT, F., 1990: „ERNEST: A Sematic Network System for Pattern Understanding“, *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 12, No. 9, S. 883-905
- [57] NILSSON, N.J., 1987: „Principles of Artificial Intelligence“, *Springer-Verlag*, Berlin, 476 S.
- [58] OUSTERHOUT, J. K., 1999: „Tcl und Tk. Entwicklung grafischer Benutzerschnittstellen für X Window System“, *Addison-Wesley*, München, 538 S.
- [59] PAKZAD K., HEIPKE C., 2000: „Knowledge Based Interpretation of Moorland in Aerial Images“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part 7B, Amsterdam, S. 1102-1110
- [60] PAKZAD K., KOCH H., TÖNJES R., 1997: „Knowledge Based Interpretation of Aerial Images and Maps using Digital Landscape Model as Partial Interpretation“, In: *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, *Birkhäuser Verlag*, Basel, Schweiz, S. 3-19
- [61] PELED, A., HAJ-YEHIA, B., 1998: „Toward automatic updating of the Israeli National GIS - Phase II“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 4, Stuttgart, S. 467
- [62] POLLOCK, R., 1996: „The Automatic Recognition of Individual Trees in Aerial Images of Forests Based on a Synthetic Tree Crown Image Model“. Dissertation, The Faculty of Computer Science, University of British Columbia, Vancouver, Kanada
- [63] REDSLOB, M., 1999: „Radarfernerkundung in niedersächsischen Hochmooren“, Dissertation, Institut für Landschaftspflege und Naturschutz, Universität Hannover, *ibidem-Verlag*, Stuttgart, 278 S.
- [64] SAGERER, G., 1985: „Darstellung und Nutzung von Expertenwissen für ein Bildanalyse-System“, *Springer-Verlag*, Berlin, 270 S.
- [65] SCHOLZE S., 2000: „Exploiting Color for Edge Extraction and Line Segment Stereo Matching in High-Resolution Aerial Imagery“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part 3B, Amsterdam, S. 815-822
- [66] SOILLE, P., 1998: „Morphologische Bildverarbeitung, Grundlagen, Methoden, Anwendungen“, *Springer*, 316 S.
- [67] STEGER C., 1998: „Unbiased Extraction of Curvilinear Structures from 2D and 3D Images“. Dissertation, Fakultät für Informatik, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, München

- [68] SUFFRIAN, A., 1999: „Untersuchungen zur visuellen Erkennbarkeit und zeitlichen Abhängigkeit von Moorklassen“, Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover
- [69] TÖNJES, R., 1999: „Wissensbasierte Interpretation und 3D-Rekonstruktion von Landschaftsszenen aus Luftbildern“, Dissertation, Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover, *Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 10, Nr. 575, VDI-Verlag, Düsseldorf, 117 S.
- [70] VON DRACHENFELS, O., 1994: „Kartierschlüssel für Biotoptypen in Niedersachsen“, aus der Reihe „Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen“, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 192 S.
- [71] WALTER, V., 1998: „Automatic classification of remote sensing data for GIS database revision“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 4, S. 641-648
- [72] WEISMILLER, R. A., KRISTOOF, S. J., SCHOLZ, D. K., ANUTA, P. E., MOMEN, S. A., 1977: „Change Detection in Coastal Zone Environments“, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43, S. 1533-1539
- [73] WEISS, M., 2000: „Verwendung von Texturparametern bei der Klassifizierung von hochauflösenden Satellitendaten“, Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover
- [74] WESSEL, B., 2000: „Untersuchungen und Erweiterungen von Merkmalsanalyseoperatoren für Moorklassen“, Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover
- [75] WIEDEMANN, C., EBNER H., 2000: „Automatic Completion and Evaluation of Road Networks“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part 3B, Amsterdam, S. 979-986

7 Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Allgemeine Struktur eines wissensbasierten Systems	13
Abbildung 2: Architektur des wissensbasierten Bildanalyse-Systems	14
Abbildung 3: Interpretationssteuerung im wissensbasierten System	17
Abbildung 4: Beispiel für konkurrierende Hypothesen	18
Abbildung 5: Möglichkeiten der Interpretationsreihenfolgen im Suchbaum	19
Abbildung 6: Interpretationsstrategie mit Initialsegmentierung	22
Abbildung 7: Interpretationsstrategie mit dynamischer Segmentierung	23
Abbildung 8: Konzept einer Objektbeschreibung im Semantischen Netz	26
Abbildung 9: Gruppierung von linienförmigen Teilobjekten im Semantischen Netz	29
Abbildung 10: Beispielnetz zur Extraktion von Objekten mit vorgegebener Geometrie	31
Abbildung 11: Konzeptnetz zur Interpretation mit vorgegebener Radiometrie/Textur	33
Abbildung 12: Beispiel parallele Linien	38
Abbildung 13: Beispiel unregelmäßige Struktur	40
Abbildung 14: Struktur mit/ohne Vorzugsrichtung	40
Abbildung 15: Analyse der Fouriertransformation	41
Abbildung 16: Beispiel homogene Fläche	42
Abbildung 17: Texturen zur Verifikation der Merkmalsanalyseoperatoren	43
Abbildung 18: Konzeptnetz zur Extraktion von Waldgebieten mit GIS-Vorwissen	47
Abbildung 19: Ergebnis einer Waldextraktion basierend auf ATKIS-Daten	49
Abbildung 20: Sequenzielle Strategie der multitemporalen Interpretation	51
Abbildung 21: Parallele Strategie der multitemporalen Interpretation	52
Abbildung 22: Zustandsstadien bei der Moor-De- und Regeneration	57
Abbildung 23: Ablauf einer Biotoptypenkartierung	59
Abbildung 24: Unterscheidbare Objektklassen im Moor	61
Abbildung 25: Konzeptnetz zur Moorinterpretation	63
Abbildung 26: Konzeptnetz zur Interpretation von Torfabbaugebieten	64
Abbildung 27: Wissensbasis für die Interpretation von Schwarzweißbildern	65
Abbildung 28: Ausschnitt mit Baumschatten (links), Selektierte Bäume (weiß) mit Schatten (rechts)	66
Abbildung 29: Strategie der multitemporalen Interpretation	67
Abbildung 30: Zustandsübergangsdiagramm zur Interpretation von Mooren	68
Abbildung 31: Modifikation des Konzeptnetzes zur multitemporalen Interpretation	69
Abbildung 32: Wissensbasis zur multitemporalen Interpretation von Schwarzweißbildern	71
Abbildung 33: Ablauf der Resegmentierung	72
Abbildung 34: Geo-Daten des Testgebietes aus der TK50	75
Abbildung 35: Bildfolge1: SW-Luftbild 1975 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	77
Abbildung 36: Bildfolge1: SW-Luftbild 1981 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	78
Abbildung 37: Bildfolge1: SW-Luftbild 1986 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	79
Abbildung 38: Bildfolge1: CIR-Luftbild 1989 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	80
Abbildung 39: Bildfolge1: CIR-Luftbild 1998 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	81
Abbildung 40: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1962 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	82
Abbildung 41: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1969 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	83
Abbildung 42: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1981 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	84
Abbildung 43: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1989 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	85
Abbildung 44: Bildfolge2: CIR-Luftbild 1998 (oben), Ergebnis der Interpretation (unten)	86
Abbildung 45: Darstellung der Zustandsübergänge anhand eines Segmentes	89
Abbildung 46: Manuelle Interpretation des Testgebietes für Bildfolge1 1998	90
Abbildung 47: Vergleich zwischen autom. Interpretation und manueller Auswertung für Bildfolge1 1998	91
Abbildung 48: CIR-Luftbild aus Bildfolge 1 für 1989	104
Abbildung 49: CIR-Luftbild aus Bildfolge 1 für 1998	104
Abbildung 50: CIR-Luftbild aus Bildfolge 2 für 1989	104
Abbildung 51: CIR-Luftbild aus Bildfolge 2 für 1998	104

Lebenslauf

Persönliche Daten

Kian Pakzad
geboren am 10. Oktober 1969 in Hannover
als Sohn von Freydoun und Falamak Pakzad

Schulbildung

1976-1980	Grundschule Wasserkamp, Hannover
1980-1982	Orientierungsstufe Gartenheim, Hannover
1982-1989	Gymnasium Käthe-Kollwitz, Hannover Abschluss: Abitur

Studium

1989-1995	Studium der Elektrotechnik an der Universität Hannover Studienschwerpunkt: Nachrichtenverarbeitung Abschluss: Diplom-Ingenieur
-----------	--

Beruf

1996-1998	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation
seit 1998	Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter / wissenschaftlicher Assistent am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Universität Hannover.

Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Heipke, Herrn Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke und Herrn Prof. Dr.-Ing. mult. G. Konecny möchte ich für die Übernahme der Referate danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Heipke möchte ich ganz herzlich für die motivierenden Diskussionen und der wissenschaftlichen Begleitung danken, die besonders in der Endphase der Arbeit zu Verbesserungen beigetragen haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke möchte ich für die fruchtbaren Diskussionen in der gesamten Zeit meiner wissenschaftlichen Tätigkeit an der Universität danken, die auch zu einigen dieser Arbeit zugrunde liegenden Ideen führten. Herrn Prof. Dr.-Ing. mult. G. Konecny möchte ich dafür danken, dass er mir den wissenschaftlichen Freiraum gewährte, der schließlich zu dieser Arbeit führte.

Ich möchte allen meinen Kollegen am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation für die angenehme Atmosphäre und die gute Zusammenarbeit danken. Zudem möchte ich den Kollegen der Gruppe Automatische Bildinterpretation am Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung für die fruchtbare Zusammenarbeit im Rahmen mehrerer Projekte danken.

Eine Arbeit wie diese kann nicht ohne Harmonie im Privaten entstehen. Ich möchte ganz herzlich meinen Eltern danken, die mir viel ermöglichten, mich in jeder Hinsicht unterstützten und mich immer motivierten, meine Ziele zu erweitern. Meinem Bruder möchte ich dafür danken, dass er - oft zur rechten Zeit - für eine fachliche Abwechslung gesorgt hat, so dass ich zu meiner Arbeit eine gewisse Distanz aufbauen konnte und aufgrund dessen vieles klarer gesehen habe.

Farbbilder

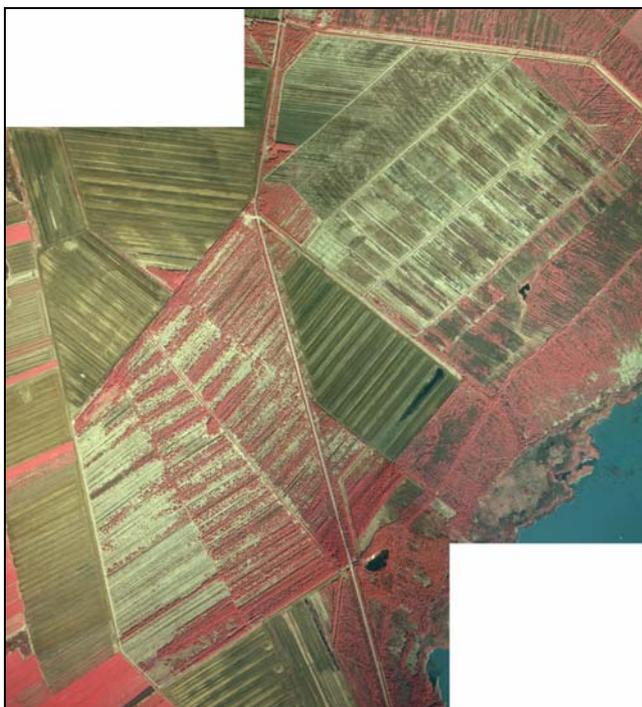


Abbildung 48: CIR-Luftbild aus Bildfolge 1 für 1989
(siehe Abbildung 38, Seite 80)



Abbildung 49: CIR-Luftbild aus Bildfolge 1 für 1998
(siehe Abbildung 39, Seite 81)



Abbildung 50: CIR-Luftbild aus Bildfolge 2 für 1989
(siehe Abbildung 43, Seite 85)



Abbildung 51: CIR-Luftbild aus Bildfolge 2 für 1998
(siehe Abbildung 44, Seite 86)