

VISUELLE UND RECHNERGESTÜTZTE LANDNUTZUNGSKARTIERUNGEN IN EINEM KOMPLEXEN TROPISCHEN BERGLAND

Ein Vergleich am Beispiel der West Usambara Berge in Tansania

Mit 3 Abbildungen, 3 Tabellen und 2 Beilagen (III, IV)

ULRICH HONECKER und ERNST LÖFFLER

Summary: Visual and computer-assisted mapping of land use/land cover in a complex tropical mountain area – using the West Usambara Mountains, Tanzania as an example

In the framework of the Tanzanian Resource Protection and Bufferzone Development Programme, land use and land cover of the West Usambara Mts were mapped. The West Usambaras constitute a highly complex mountain system both in terms of land use/land cover and relief. In this paper the results of a visual interpretation of high quality CIR aerial photographs are compared with a computer-based classification in order to show whether or under which circumstances digital classification can replace visual interpretation in an area of complex land use/land cover and high relief. The main advantage of the visual interpretation lies in the direct and correct identification of complex land cover classes. Difficulties, however, occur in the precise delineation of complex mapping units. The automatic classification, in contrast, produces a much more detailed delineation of mapping units giving the impression of greater mapping precision. However, the reliability of the classification is problematic because of a high proportion of mixed pixels. A considerable improvement of the classification can be achieved by using a digital elevation model as well as contextual knowledge (in this case agroecological zones). Both methods have advantages and shortcomings, however, as an operational method visual interpretation of aerial photographs will be difficult to replace, especially in areas of complex relief and land use/land cover.

Zusammenfassung: Im Rahmen des "Tanzanian Resource Protection and Bufferzone Development Programme" wurden Landnutzung und Vegetation der West Usambara Berge kartiert. Die West Usambara Berge stellen sowohl vom Relief als auch von der Landnutzung und Vegetation ein sehr komplexes Gebirgssystem dar. In dieser Arbeit werden die Ergebnisse einer visuellen Interpretation von Farbinfrarotaufnahmen (ausgezeichnete Bildqualität, mittlerer Maßstab 1:27 000) mit einer rechnergestützten Klassifizierung verglichen, um festzustellen, ob und unter welchen Bedingungen ein rechnergestütztes Verfahren, die visuelle Interpretation ersetzen kann bzw. welches der beiden Verfahren zuverlässigere Ergebnisse liefert. Es wird gezeigt, dass der Hauptvorteil der visuellen Kartierung in der unmittelbaren und korrekten Identifizierung von komplexen Landnutzungsklassen besteht und die Arbeit in einem günstigen Zeitrahmen durchgeführt werden kann. Schwierigkeiten entstehen allerdings in der genauen Abgrenzung dieser Einheiten. Die automatische Klassifikation dagegen ergibt eine sehr viel detailliertere Abgrenzung der Einheiten und vermittelt den Eindruck größerer Kartiergenauigkeit. Die Zuverlässigkeit der Kartierung ist jedoch wegen des hohen Anteils an Mischpixeln problematisch. Eine beträchtliche Verbesserung der Klassifikation kann durch Integration eines digitalen Höhenmodells und der Einbeziehung von Kontextwissen wie in diesem Fall die agroökologischen Zonen, erreicht werden. Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile; für die operationelle Durchführung einer Kartierung ist die visuelle Interpretation guter Luftbilder nach wie vor schwer zu ersetzen, insbesondere in Gebieten mit komplexem Relief und Landnutzungsverhältnissen.

Vorbemerkung

Die flächenhafte Erfassung von Landnutzung und Vegetation gehört seit langem zu den zentralen Anwendungsgebieten der Fernerkundung. Während früher die konventionelle Luftbildauswertung im Vordergrund stand, fanden mit der rasanten Entwicklung digitaler Bildverarbeitungsverfahren automatische Klassifizierungen immer stärkere Anwendung. Allerdings sind Berichte über Erfolg und Zuverlässigkeit automatischer Verfahren sehr unterschiedlich. Ein wesentlicher Faktor für die Zuverlässigkeit automatischer Verfahren stellt der Grad der Komplexität der zu klas-

sifizierenden Landschaft dar. Je homogener und großflächiger die Landnutzung und je flacher das Relief, desto größer die Treffsicherheit automatischer Verfahren. Im folgenden Beitrag werden am Beispiel der West Usambara Berge (Nordost-Tansania) die Ergebnisse einer Landnutzungs- und Vegetationskartierung durch visuelle Luftbildinterpretation von CIR Aufnahmen einer rechnergestützten Klassifikation vergleichend gegenübergestellt, um herauszufinden, inwieweit in einem dicht besiedelten, stark reliefierten und intensiv landwirtschaftlich genutzten Raum die rechnergestützte Klassifizierung die visuelle Luftbildinterpretation ersetzen kann.

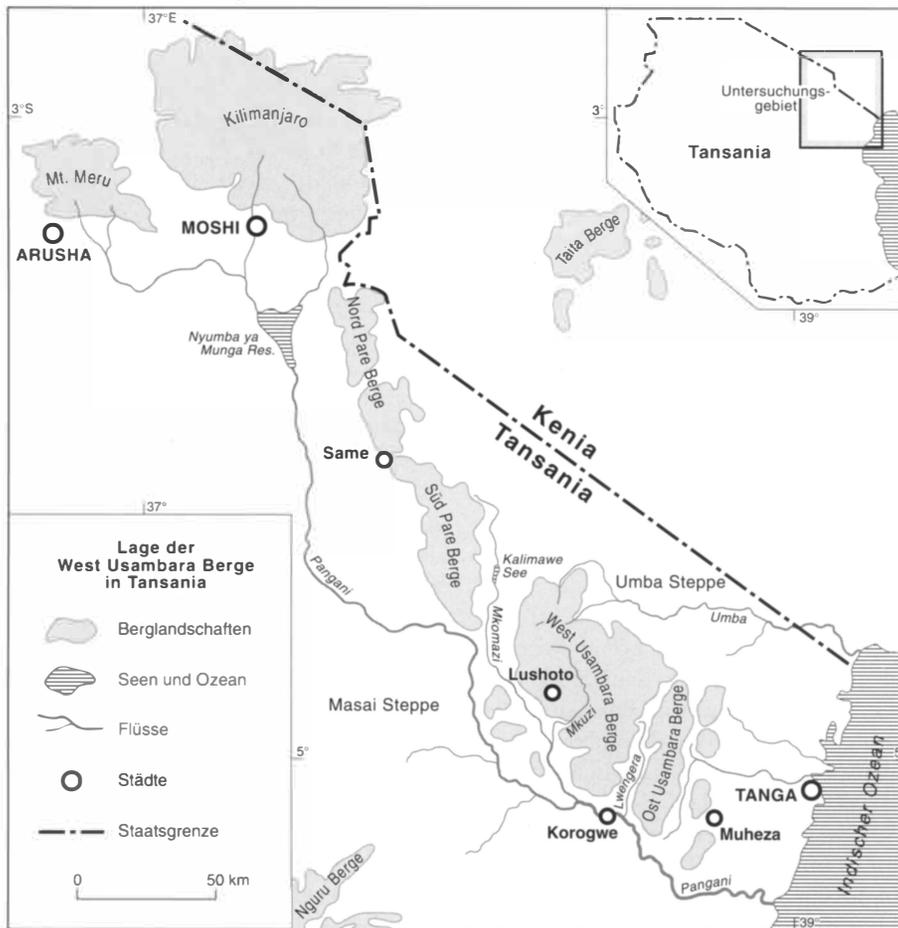


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebiets der West Usambara Berge
Location map of the West Usambara Mts

1 Das Untersuchungsgebiet

Die West Usambara Berge sind Teil einer etwa nordwestlich streichenden Serie von Gebirgsblöcken im nordöstlichen Tansania, die sich vom Indischen Ozean bis zum Kilimandscharo erstrecken. Sie nehmen eine Fläche von ca. 2430 km² ein und überragen mit durchschnittlichen Höhen um 1500 bis 2000 m das umgebene Flachrelief um mehr als 1000 m. Ihre Lage und naturräumliche Zuordnung ist in Abbildung 1 dargestellt.

1.1 Geomorphologie

Die West Usambara Berge erheben sich mit einer wandartig gegen das umgebende Flachland (Masai-Steppe) aufragenden Stufe (Escarpmnt), deren obere Abschnitte oft durch nahezu senkrechte nackte Felspartien gekennzeichnet sind. Dieses Escarpmnt läßt sich

rund um die West Usambara Berge verfolgen, auch wenn der Grad der Steilheit im Osten und Nordosten etwas abgeschwächt ist. Aufgrund des Anstiegens der umgebenden Ebenen liegt der Hangfuß im südlichen Bereich bei rund 400 m Höhe, im nordwestlichen Bereich zwischen 700 bis 800 m.

Der innere Teil der West Usambara Berge erhebt sich mit einigen Bergkuppen bis über 2000 m. Das Oberflächenniveau erfährt eine Abdachung von Nordwesten nach Süden bis Südwesten durch mehrmaliges Zerbrechen und Treppung einer gehobenen Scholle (Bruchschollentreppen) (EZAZA 1985, 21). Höchste Erhebung ist der Magamba (Chambolo) mit 2305 m. Tektonische Verwerfungen säumen das Escarpmnt des Gebirgsblocks und sind schließlich Ausdruck der Heraushebung dieser Horststruktur. Der Lwengera-Graben trennt die Usambara Berge in einen Ost- und Westteil; der Mkomazi-Graben bildet den Übergang zur Masai-Steppe im Südwesten. Die Usambara-Ge-

steine sind spät proterozoischer Anlage und werden der frühen mozambidischen unteren Kruste zugerechnet, die über die jüngeren Gesteine der Masai-Steppe übergeschoben wurden (SHACKELTON 1993, 670). Erst mit dem Einsetzen tektonischer Bewegungen im Tertiär kommt es zur Heraushebung und Entstehung der heutigen Horststruktur, den Störungslinien, Schollen und Bruchstufen (EZAZA 1985, 20; SHACKELTON 1993, 665).

1.2 Klimatische Verhältnisse

Das Klima der West Usambara Berge wird geprägt vom Einfluss der Passatwinde (Nordost- und Südostpassat), der Nähe zum Indischen Ozean, der Höhenlage, sowie ihrer (partiellen) Leelage zu den Ost Usambara Bergen (ATTEMS 1967, 20; LUNDGREN a. LUNDGREN 1979, 159). Im Südwinter zwischen März und Mai sorgt der Südostpassat für ergiebige und relativ sichere Niederschläge. Mit dem Südsommer erreicht der Nordostpassat seinen Einfluss und bringt zwischen November und Dezember/Januar den unsicheren Kurzregen, der z. B. 1998/99 ausfiel. Lediglich in den höher gelegenen Regionen der West Usambara Berge kommt es im August zu einer weiteren Zwischenregenzeit. Die große Trockenzeit, von Juni bis September, ist gleichzeitig die kühlfste Jahreszeit, mit monatlichen Mittelwerten von örtlich unter 18 °C (LUNDGREN a. LUNDGREN 1979, 160). EZAZA (1985, 30) ordnete das Klima der District-Stadt Lushoto (ca. 1400 m ü. NN, 20,6 °C Jahresmitteltemperatur) den Aw-Klimaten nach Köppen zu. Aufgrund der starken Höhenunterschiede und des hypsometrischen Temperaturgradienten (0,55 bis 1 K/100 m) sind in den oberen Höhengniveaus Cw-Klimate verbreitet. In den tieferen Lagen schließen sich BS-Klimate an. Diese Trockenklimate treten u. a. im unmittelbaren Regenschatten der Ost Usambaras sowie im Bereich der Fußflächen des Escarpments auf. Bereits MOREAU (1935, 12) gliederte das Klima der Usambaras in semiarid, semihumid und humid und konstruierte eine Karte der Humiditätsverteilung auf der Basis von 25 Wetterstationen. Der jahreszeitliche Ablauf des Klimas und die Auswirkungen auf die Phänologie der Pflanzen sowie die Abfolge des landwirtschaftlichen Anbaus sind aufgrund ihres Einflusses auf die Reflexion für die Interpretation der Fernerkundungsdaten wichtig.

1.3 Vegetation und Landnutzung

Die natürliche Vegetation der Usambara Berge war Wald, dessen floristische Zusammensetzung und Struktur in Abhängigkeit von Feuchtigkeitsverhältnis-

sen, Höhenlage und Hangsteilheit stand (HELLBERG 1989, 18; LUNDGREN a. LUNDGREN 1979, 160; MWIHOMEKE 1987, 26–29). Von der ursprünglichen Waldbedeckung – tropischer Regenwald in den feuchten tiefer liegenden Gebieten und tropischer Bergwald (Afromontane forest und montane forest) in den Höhenlagen über 1400 m sowie Trockenwald und Buschformationen in den trockenen Bereichen – sind nur noch unterschiedlich stark degradierte Reste, vor allem in den höher gelegenen Bereichen vorhanden (vgl. Beilage III).

Die Landnutzung vor der Kolonialisierung war eine Landwechselwirtschaft, die jedoch im Laufe der Zeit sowohl durch Bevölkerungswachstum als auch durch verschiedene Zwangsmaßnahmen der früheren Kolonialverwaltungen in einen mehr oder weniger permanenten Ackerbau überging. Die heutige Situation ist daher durch relativ intensiven Dauerfeldbau gekennzeichnet, der zwar noch Elemente traditioneller Subsistenzwirtschaft wie die vielschichtige Mischkultur (Beilage III) enthält, aber doch weitgehend auf die Produktion von cash crops ausgerichtet ist (ATTEMS 1967, 43). Mit Abstand wichtigste Feldfrucht ist der Mais, gefolgt von Bohnen, Bananen, Cassava und Süßkartoffel. Cash crops sind neben Tee (Beilage III) und Kaffee vor allem Gemüse in den Talböden (Beilage III) und Obst. Eine Besonderheit der Agrarlandschaft der Usambaras stellen die zur Bodenerosionskontrolle angelegten terrassenähnlichen Makrokonturen dar. Diese wurden zum großen Teil über verschiedene Entwicklungshilfeprojekte insbesondere auch der GTZ gefördert (Beilage III). Aufgrund der 1987 eingeführten starken Beschränkung der Beweidung (zero grazing by law) ist Weideland heute in den feuchteren Gebieten praktisch verschwunden, in den trockenen Teilen der Usambaras stellt die Weidewirtschaft jedoch nach wie vor ein wichtiges Element dar und ist auch für die dort fortschreitende Bodendegradation verantwortlich.

1.4 Agroökologische und öko floristische Gliederung

Aufgrund der starken Reliefierung und der damit verbunden Höhendifferenzierung, der Exposition zu den niederschlagsbringenden Passatwinden sowie der Lage zu den als Regenfänger fungierenden Ost Usambara Bergen kommt es innerhalb der West Usambara Berge zu einer relativ starken und kleinräumigen Klimadifferenzierung, was sich insbesondere in der Niederschlagsverteilungen ausdrückt (EZAZA 1985, 34).

Für die Bearbeitung von Fernerkundungsdaten ist eine Stratifizierung eines Gebiets auf der Grundlage von agroökologischen und öko floristischen Kriterien deshalb sinnvoll, weil hierin eine Möglichkeit gesehen

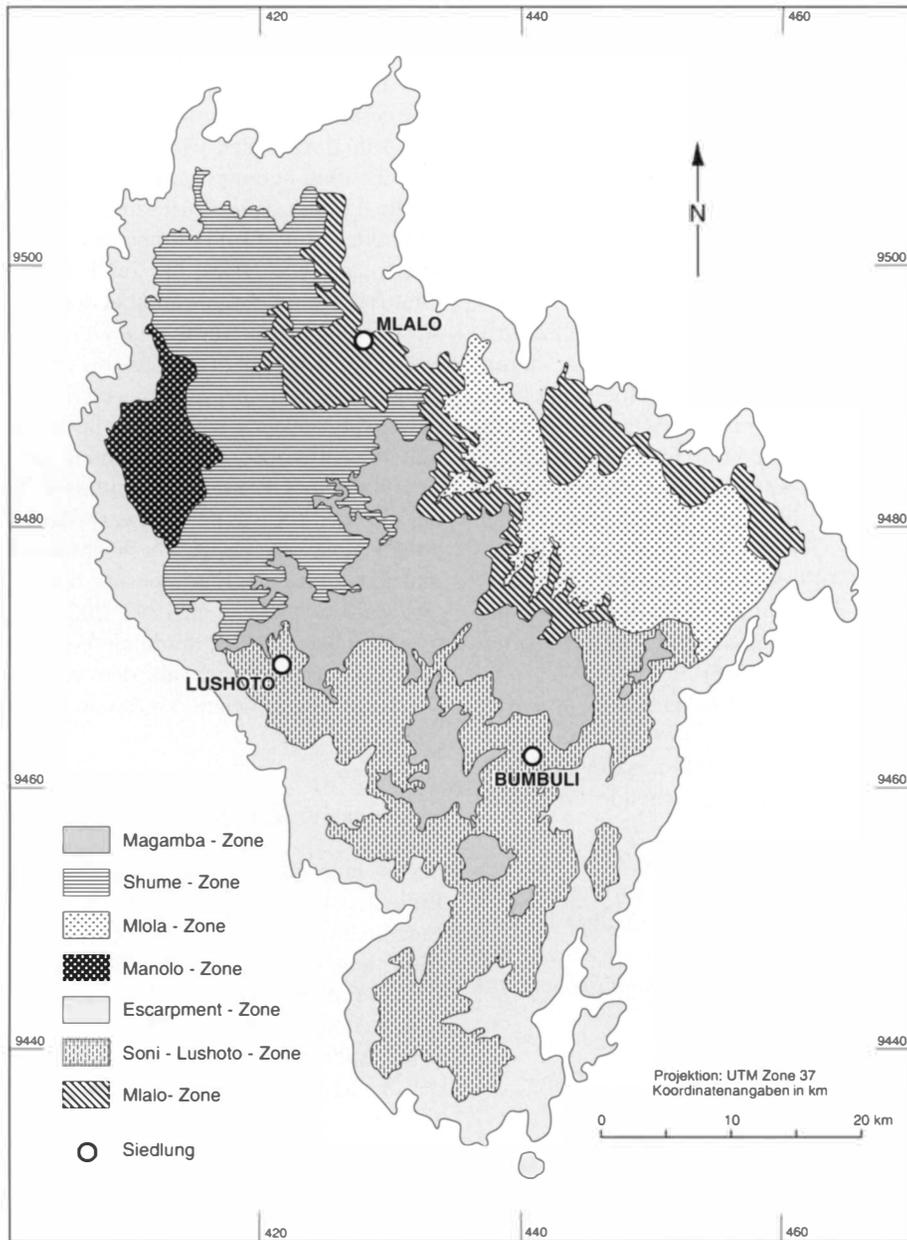


Abb. 2: Agroökologische Zonen der West Usambara Berge (Details siehe Text)
Agroecological zones of the West Usambara Mts (details see text)

wird, das von rein spektralen Informationen unabhängige Kontextwissen in die rechnergestützte Klassifikation einzubringen und so die Klassifizierungsgenauigkeit des rechnergestützten Prozesses zu erhöhen, v. a. aber eine sinnvolle Unterteilung des Gesamtgebietes in „homogenere“ Untereinheiten mit kleinerer Flächenausdehnung und geringerer Anzahl an Vegetations- und Nutzungsklassen zu erreichen (HOWARD a. LANTIERI 1987, 144). In Anlehnung an WOYTEK et al.

(1987, 27), MWIHOMEKE (1987, 29) und KAONEKA (1993, 7) sowie aufgrund eigener Beobachtung lassen sich folgende agroökologische Zonen unterscheiden (Abb. 2):

a) Die Escarpment-Zone: Sie wird im wesentlichen von dem die Usambara Berge umgebenden Steilhang, dem sog. Escarpment gebildet. Sie stellt den Übergang von den umgebenden Ebenen zu dem dicht besiedelten Inneren Usambaras dar. Steile, teilweise nahezu senk-

rechte Hänge und kleine Wassereinzugsgebiete charakterisieren diese Zone (815 km²).

b) Soni-Lushoto-Zone: eine warm-feuchte Zone mit Niederschlägen zwischen 800 und 1700 mm/a, mit drei trockenen Monaten und einer Höhenlage von 1000 bis 1300 m. Sie ist eine wichtige Gemüseanbauzone (413 km²).

c) Mlalo-Zone: eine warm-trockene bis warm-semihumide Zone mit Niederschlägen zwischen 500 und 800 mm/a, einer viermonatigen Trockenperiode und einer Höhenlage zwischen 1200 und 1800 m (222 km²).

d) Magamba-Zone: eine warm-gemäßigte agrarökologische Übergangszone in einer Höhenlage zwischen 1500 und 1700 m. Sie ist überwiegend Verbreitungsgebiet des "Afromontane rain forest" (311 km²).

e) Shume-Zone: eine kühl-trockene Zone mit Niederschlägen zwischen 500 und 800 mm/a, einer Trockenperiode von vier Monaten und einer Höhenlage von 1700 bis 2100 m. Zeitweise tritt nächtlicher Frost auf, der sich jedoch auf die Talböden beschränkt. Diese Zone ist das Hauptanbauggebiet für Obstsorten der gemäßigten Breiten (361 km²).

f) Mlola-Zone: eine warm-trockene Zone mit Niederschlägen zwischen 500 und 750 mm/a und einer Höhenlage zwischen 500 und 1000 m (239 km²). Die Zone ist als einzige durch vorherrschende Weidenutzung gekennzeichnet.

g) Manolo Zone: eine kalt-trockene Zone in einer Höhenlage zwischen 1800 und 2000 m. Sie liegt im Lee der beiden höchsten Bergrücken (Magamba und Shagayu). Ihr natürlicher Vegetationstypus stellt der "Single dominant Afromontane Juniperus excelsa forest" dar (70 km²).

2 Kartierungsgrundlagen

Für die visuelle Interpretation standen Luftbilder und Orthophotos sowie ein Farbkomposit eines Satellitenbildes (Beilage III) zur Verfügung. Die qualitativ hochwertigen CIR-Luftbilder mit einem Maßstab von ca. 1:27 000 und die BW-Luftbilder im Maßstab 1:54 000 wurden von MAPS-geosystems zwischen Anfang August und Anfang September 1996 (Große Trockenzeit) aufgenommen. Für das von der GAF hergestellte Farbkomposit wurden die Bänder 4, 5 und 3 (R-G-B) einer systemkorrigierten und georeferenzierten Landsat-5-TM Szene (WRS 167/63) vom 28. Januar 1997 verwendet (Beilage III). Das Farbkomposit hatte einen Maßstab von 1:50 000 und wies nach optischer Prüfung keine atmosphärischen Störungen (Wolken, Rauch, etc.) auf. Die Bandkombination mit hohem Infrarotanteil (Bänder 4 und 5) ist zur visuellen

Interpretation der Vegetation gut geeignet und minimiert den störenden atmosphärischen Einfluß. Die CIR-Luftbilder decken einen großen Teil, nicht aber das gesamte Kartierungsgebiet ab. Zur Bearbeitung der Aufnahmelücken wurden BW-Luftbilder bzw. das Satellitenbild herangezogen.

Die Landnutzungskartierung wurde von den CIR Luftbilder auf Orthophotos im Maßstab 1:25 000 übertragen. Das DHM, das zur Erstellung der Orthophotos notwendig war, stand bei den rechnergestützten Auswertungen zur Verfügung. Der Geländeaufenthalt erstreckte sich vom 7. 7. 1997 bis zum 2. 9. 1997. Im Gelände wurde stichprobenartig jede Kartiereinheit nach Möglichkeit mehrmals, mindestens jedoch einmal überprüft. Zusätzlich dienten Karten (Maßstab 1:50 000) eines Landnutzungsatlasses (TIRDEP 1980), die auf der Basis einer Schwarz-Weiß-Luftbildbefliegung erstellt wurden, zu Vergleichszwecken. Die minimal abzugrenzende Flächengröße betrug 5 mm x 5 mm (vgl. auch SAXENA et al. 1992, 2023) bzw. bei langgestreckten Flächen eine minimale Weite von 3 mm. Dieser Wert entspricht ungefähr dem von ANDERSON et al. (1976, 5) angegebenen Wert von 2,54 mm (= 0,10 inch).

3 Kartierungseinheiten (Klassenbeschreibung)

Auf eine eingehende Beschreibung der kartierten Einheiten wird hier verzichtet, da die Details für die Fragestellung nicht entscheidend sind. Die folgende Auflistung beschränkt sich daher auf eine Kurzbeschreibung der wichtigsten Merkmale der Kartierungseinheiten auf unterster Gliederungsebene (Level III s. u.). Außerdem sind die Einheiten auf der Legende der Beilage IV aufgeführt und es ist leicht nachvollziehbar, dass die zahlreichen Kultur- und Naturlandschaftsklassen eine sehr heterogene Ausprägung besitzen.

3.1 Kulturlandschaftsklassen

Unter diesem Begriff sind all diejenigen Kartierungseinheiten zusammengefasst, die anthropogenen Ursprungs sind.

– *Siedlungen (S)*: Diese Klasse erfasst alle besiedelten Flächen. Eine weitere Differenzierung findet nicht statt, so dass unter diesem Begriff sowohl Weiler als auch kleinere Städte zusammengefasst werden.

– *Überwiegend annueller Ackerbau (Ca)*: Annueller Ackerbau bedeutet den Anbau von Kulturpflanzen, die innerhalb einer Vegetationsperiode gepflanzt und geerntet werden können. Nach der Ernte muss das Feld wieder neu bestellt werden. Es findet ein zeitlicher Kul-

turartenwechsel statt, der sich in einem räumlichen Kulturartengefüge ausdrückt (SICK 1993, 112ff). In dieser Kartierungseinheit sind keine Maßnahmen zum Erosionsschutz oder Terrassierungen vorhanden. Angebaut werden Kartoffeln, verschiedene Gemüse (Tomaten, Kohl, Karotten etc.) insbesondere in den intensiv kultivierten Talböden und Getreide (v. a. Mais und Weizen) in den Hanglagen.

– *Annueßer Ackerbau mit Makrokonturen* (Cc): Physiognomisch bildet diese Klasse eine Übergangsform zwischen dem Anbau ohne Erosionsschutzmaßnahmen und dem Anbau mit der vollen Ausprägung der Makrokonturen mit Bäumen (s. u.).

– *Annueßer Ackerbau mit eingestreuten Bäumen* (Ct): In Mischkultur werden einjährige Feldkulturen (Mais, Bohnen, Maniok, Cassave, etc.) mit Obstbäumen (Mango, Papaya, Jakfrucht, Pfirsich, Pflaumen, etc.) aber auch bau- und brennholzliefernden Bäumen verschiedener Herkunft und Größe als Dauerkultur gemeinsam angebaut. Die Bestandsdichte liegt deutlich unter der vielschichtigen Mischkultur (s. u.).

– *Annueßer Ackerbau mit Bäumen und Makrokonturen* (Ctc): Prägendes Merkmal sind höhenlinienparallel angelegte Baum- und/oder Grasstreifen (Guatemalagras, *Tripsacum laxum*) in Abständen von 3 bis 25 m (PRINZ 1982, 158), je nach Hangneigung. Dazwischen findet Anbau annueßer Kulturen statt.

– *Brache* (Cr): Hierunter werden extensiv bewirtschaftete Flächen wie sie durch alternierende Anbau- und Brachejahre entstehen, zusammengefasst.

– *Vielschichtige Mischkultur* (Cm): Die als vielschichtige Mischkultur bezeichnete Anbauweise verbindet auf einer Nutzungspartelle Subsistenzwirtschaft und marktorientierten Anbau von Dauerkulturen und annuellen Nutzpflanzen. In seinem idealisiertem Aufbau können mehrere Stockwerke unterschieden werden. In der Bodenschicht werden Gemüsearten (Bohnen, Maniok, Süßkartoffel, etc.) angepflanzt, darüber folgen Kaffeesträucher, die wiederum von den Bananenstauden überdeckt werden. Oberstes Stockwerk sind Schattenbäume (häufig *Albizia schimperiana*), die Früchte oder Brennholz liefern (vgl. ATTEMS 1967, 43; HELBERG 1989, 23).

– *Teeanbau der Kleinbauern* (Ts): Kleinere, verteilte Teeanpflanzungen, meist im Umfeld einer größeren Teeplantage. Die Felder sind im Besitz von Kleinbauern, die neben der Dauerkultur Tee noch weitere annuelle und permanente Kulturen auf anderen Parzellen zur Selbstversorgung anbauen.

– *Teeplantagen* (Tp): Großflächige Teemonokulturen inklusive der Gebäudekomplexe.

– *Weideland* (G): Flächen, die überwiegend der Grünlandwirtschaft (Futterversorgung) des Viehs die-

nen. Hierunter werden sowohl intensive Formen in den Tälern als auch extensive Formen in den verschiedenen Zonen verstanden.

– *Akazien-Waldparzellen* (La): Waldparzellen (village woodlots) oder auch Kleinplantagen und (ARNOLD 1995, 162) dienen überwiegend der Brenn- und Bauholzversorgung der Bevölkerung. Akazien-Waldparzellen setzen sich überwiegend aus Gerberakazie (*Acacia mearnsii*) zusammen.

– *Gemischte Waldparzellen* (Lu): Gemischte Waldparzellen setzen sich aus Gerberakazie (*Acacia mearnsii*), *Grevillea robusta*, Eukalyptusbäumen oder diversen Kiefernarten in wechselnden Anteilen zusammen.

– *Forstplantagen* (Fp): Größere zusammenhängende Aufforstungen, die der Gewinnung von Rohstoffen wie Hart- und Weichholz (z. B. *Pinus patula*, *Cupressus lusitana* und *Juniperus procera* oder der Gerbstoffgewinnung (*Acacia mearnsii*) dienen.

3.2 Naturlandschaftsklassen

Unter diesem Begriff werden Kartierungseinheiten zusammengefasst, die nicht anthropogenen Ursprungs sind. Im wesentlichen sind dies die drei Waldtypen Juniperus Wald (FJ), Übergangswald (FR) und Afromontaner bzw. undifferenzierter montaner Regenwald (FA) und die niedrigen Gehölzformationen Buschwald und Buschland (W, WdS, Cl). Da ein wesentliches Ziel der Untersuchung die Erfassung der Walddegradation war, wurde diese in drei Stufen von leicht bis schwer geschädigt dargestellt. Auf eine farbliche Differenzierung der Waldtypen wurde der Übersichtlichkeit wegen verzichtet; ihre Lage kann jedoch aus der Karte der agroökologischen Zonen (Abb. 2) entnommen werden.

– *Leicht degradierte Waldbestände* (FA, FJ, FR): Diese Bestände liegen im Zentrum größerer Waldareale und weisen überwiegend ein dichtes und geschlossenes Kronendach auf, das nur von wenigen Lichtungen und Lücken (maximal 10% der Waldfläche) unterbrochen ist.

– *Gemäßigt degradierte Waldbestände* (FAm, FJm, FRm): Diese Einheit umgibt die leicht degradierten Bestände und weist deutliche Spuren des Holzeinschlags auf. Größere Lichtungen (10–30% der Waldfläche) durchsetzen die Wälder und der Kronenschluss ist unregelmäßig.

– *Schwer degradierte Waldbestände* (FAs, FJs, FRs): Diese Bestände bestehen aus einer Mischung von unterschiedlich hohen Baumbeständen und größeren Lichtungen (mehr als 30% der Waldfläche) mit Farnen und Erikgbüsch (*Philippia* spp.).

– *Buschwald* (W): Buschwald besteht aus weitständigen Bäumen, deren Baumkronen sich nicht berühren, so dass ein offenes Kronendach entsteht. Es kommt nicht zur Stockwerksbildung, Gräser bilden die Bodenschicht. Der Bedeckungsgrad liegt zwischen 20 und 70 Prozent, die Wuchshöhe bei 5 bis 15 m.

– *Buschland* (WdS): Die maximale Wuchshöhe wird mit 5 bis 7 m angegeben und der Bedeckungsgrad durch Baumbestände liegt unter 20 Prozent. Gräser bilden die Bodenschicht.

– *Bergbuschland* (Cl): Es sind meist kleine Flächen, auf Bergkuppen und Bergrücken beschränkte, baumlose, hauptsächlich mit Erikagebüsch (*Philippia ssp.*) bewachsene Standorte.

Die Kartierungseinheiten wurden einer hierarchischen Gliederung unterzogen. Bei den Naturlandschaftsklassen wurde auf oberster Ebene (Level I) zwischen hohen Gehölzformationen (Wälder) und niedrigen Gehölzformationen unterschieden. Die zweite Ebene (Level II) differenziert nach der Bestandsdichte und auf unterster Ebene (Level III) wurde nach den Waldtypen untergliedert. Die Kulturlandschaftsklassen unterscheiden auf oberster Ebene (Level I) Weideland, Ackerbau, Aufforstungen und Siedlungen. Auf zweiter Ebene (Level II) werden die Aufforstungen nach Waldparzellen und Forstplantagen differenziert, der Ackerbau nach annuellem Anbau und Dauerkulturen. Weideland und Siedlungen wurden nicht weiter differenziert. Auf unterster Ebene (Level III) werden die Waldparzellen und die verschiedenen Ausprägungen des Ackerbaus differenziert.

4 Satellitenbild-Korrekturen

4.1 Geometriekorrektur

Die Satellitenszene (Landsat-TM-5 167/63 vom 28. 1. 1997) wurde aufgrund des sehr bewegten Reliefs einer Orthorektifizierung unterzogen. Das Resampling wurde vor der Klassifikation nach der Nearest-Neighbor-Methode durchgeführt. (ITTEN et al. 1992, 8–11, ERDAS INCORPORATION 1997, 298–303)

4.2 Atmosphärenkorrektur

Mit einer einfachen DOS-Technik (dark object subtraction), sowie parallel dazu, durch Entfernen der Haze-Komponente im Tasseled-Cap-Verfahren wurden die TM-Bänder 2–5 und 7 atmosphärisch korrigiert (CHAVEZ 1988, 459; CHAVEZ 1996, 1025; KATTENBORN 1991, 48; CRIST a. KAUTH 1986, 82 und ERDAS INCORPORATION 1997).

4.3 Topographiekorrektur

Eine einfache Möglichkeit expositionsbedingte radiometrische Unterschiede zu beseitigen, besteht darin, die beiden spektralen Gruppen „hell“ und „dunkel“ in der Klassifikation getrennt zu behandeln und anschließend zu einer Klasse zusammenzuführen. Zur Unterstützung der jeweils zwei Helligkeits-Unterklassen (Schatten- und Sonnenhang) einer Klasse, wurde ein „Beleuchtungslayer“ in den Klassifikationsprozess als zusätzliche Information eingebunden, womit auch die zahlreichen Übergänge mit erfasst werden.

Die topographische Normalisierung stellt eine weitere Korrekturmethode dar. Der wesentliche Effekt ist eine Anhebung der Reflexionswerte in den Bereichen der Schattenhänge. Die Korrektur wird mit einem Lambertschen Reflexionsmodell durchgeführt, dabei sollte beachtet werden, daß mit TEILLET (1986, 1640) das Lambertsche Reflexionsmodell nur Gültigkeit besitzt für Hangneigungen kleiner 25° (vgl. JUSTICE 1981). Des Weiteren kommt es nach ORTHABER (1997, 12) zu Ungenauigkeiten infolge ungenauer Sonnenstandsparameter innerhalb einer TM-Szene, da die Sonnenstandsdaten lediglich Gültigkeit für den Vollszenenmittelpunkt besitzen. Diese Nachteile müssen bei der Durchführung der topographischen Normalisierung hier unkorrigiert bleiben. Die bereits vorhandenen und nach der Tasseled-Cap-Methode atmosphärisch korrigierten TM-Bänder wurden dieser Prozedur unterzogen, so dass zur Klassifizierung ein lediglich nach der DOS-Methode korrigierter und ein nach der Tasseled-Cap-Methode und gleichzeitig topographisch normalisierter TM-Datensatz zur Verfügung standen.

4.4 Zusatzinformationen

Zusätzlich zu der rein spektralen Informationsebene der Landsat-5-TM Bänder sollten weitere Informationsebenen in den Klassifikationsprozess eingebunden werden, die entweder aus den TM Bändern oder dem DHM abgeleitet werden können. Gerade die aus dem DHM abgeleiteten Größen stellen einen deutlichen Informationsgewinn dar, da sie unabhängig von der spektralen Information sind. Darüber hinaus soll durch Zonierung des Arbeitsgebietes Kontextwissen in die Klassifikation einfließen. Diese Zusatzinformationen setzen sich zusammen aus dem NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), dem am weitest verbreiteten Vegetationsindex (BANNARI et al. 1995, 114), zwei Texturlayer aus statistischen Werten des TM-4-Bandes und des NDVI-Layers, sowie drei Layern aus Reliefparametern des DHM (Hangneigung, Krümmung und Reliefschatten). Zusätzlich wurde das Arbeitsgebiet

durch Hinzunahme des Zonierungsmodells in sieben Teilräume getrennt und jeweils separat klassifiziert. Abbildung 3 zeigt im Überblick den Ablauf der vorbereitenden Schritte.

5 Klassifikation

Als Klassifikationsmethode wurde der Parallelepiped-Algorithmus ausgewählt. Aufgrund von Grenzwerten, die hier über die Trainingsgebiete festgelegt werden (Minimum und Maximum der Grauwertverteilung), wird die Zugehörigkeit eines Pixelwertes zu einer Klasse bestimmt (ERDAS INCORPORATION 1997, 244). Für die beiden Sonderfälle (Pixel im Überlappungsbereich und Pixel außerhalb definierter Bereiche) wird der Maximum-Likelihood-Algorithmus angewandt, versehen mit einer Vorauswahrscheinlichkeit für die einzelnen Klassen. Nachdem die Klassifikation für alle sieben Teilgebiete getrennt durchgeführt worden war, wurden diese zusammengefügt. Ein Majoritätsfilter wurde auf das Klassifikationsergebnis angewandt, um vereinzelt Pixel zu eliminieren bzw. das Ergebnis zu generalisieren. Die Fenstergröße wurde mit 5 x 5 Pixeln dem Generalisierungsgrad der Luftbildinterpretation (entspricht 5 mm x 5 mm bei Maßstab 1:25 000) angepaßt.

5.1 Trainingsgebietsauswahl

Falls möglich wurde eine Mindestzahl von 100 Pixel pro Trainingsgebiet verwendet. Dies ermöglicht die Einbeziehung von bis zu zehn Kanälen in die Klassifikation. Die Trainingsgebietsauswahl gestaltet sich in dieser komplexen Kulturlandschaft sehr schwierig und zeitaufwendig, um die einzelnen Situationen zu berücksichtigen. Je nach Klassenanzahl und Größe der Zone erhält man mitunter mehr als insgesamt 150 Trainingsgebiete pro Zone (vgl. ANHUF 1997, 104–105 und LÖFFLER 1994, 192–193). Die Trainingsflächen machen damit ca. zwei bis vier Prozent der jeweiligen Zonenfläche aus.

5.2 Layerauswahl

Aus den vorgegebenen 16, der automatischen Klassifikation zur Verfügung stehenden Layern, sollten nicht mehr als neun ausgewählt werden. Damit wären 11 440 Kombinationen theoretisch möglich. Zur Auswahl der geeigneten Layerkombination konnten Error-Matrizen berechnet werden, die unabhängig von der gewählten Klassifikationsmethode sind (CONGALTON 1991). Eine solche Matrix stellt die Beziehung zwischen

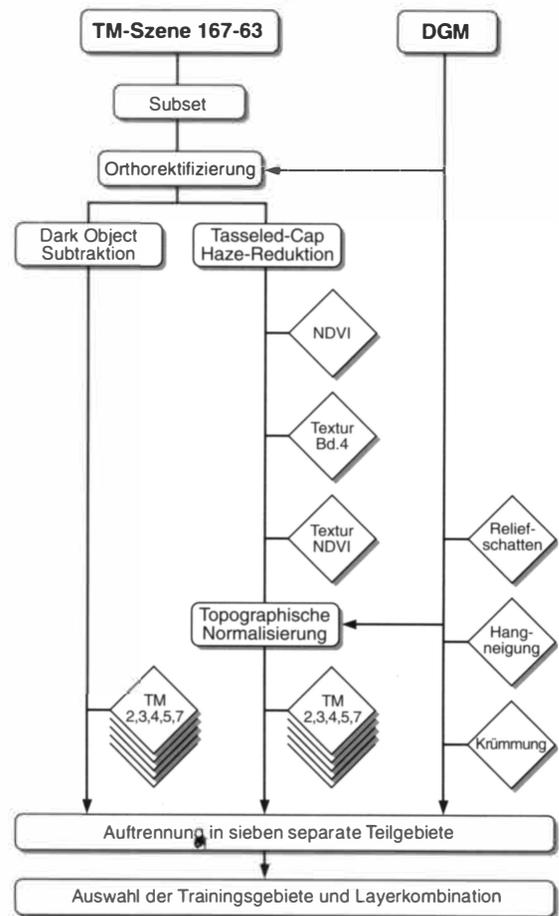


Abb. 3: Übersicht über die Klassifizierungsvorbereitung
Diagram of classification procedures

den Eingangsdaten (Referenzdaten, hier: Pixel der Trainingsgebiete) und den Ergebnisdaten (hier: klassifizierte Pixel der Trainingsgebiete) der Klassifikation dar. Man kann daraus die Anzahl richtiger oder fehlerhafter Klassifikationen (der Trainingsgebiete) unter Berücksichtigung des Klassifikationsverfahrens ablesen. Die daraus abgeleitete Overall-Accuracy dient als Indikator für die Qualität der Trainingsgebiete. Als Referenzzone wurde die Soni-Lushoto-Zone wegen ihrer Größe und ihrer Klassenvielfalt (21 Klassen) gewählt, um die beste Layerkombination zu ermitteln. Die endgültige Kombination besteht aus den folgenden neun Layern: DOS-korrigierte TM-Kanäle 2, 3, 4, 5, und 7, Hangneigung, Reliefschatten, NDVI und Texturlayer aus TM-Band 4. Die Kombination hat eine Overall-Accuracy von 71,3% auf unterster Klassifikationsebene.

Tabelle 1: Statistische Verteilung der Flächennutzungen

Statistical distribution of land cover

Flächennutzungs- klassen	Luftbildinterpretation (Vektordaten) [ha]	Luftbildinterpretation Rasterdaten) [ha]	(Rechnergestützte Klassifikation (Rasterdaten) [ha]
S	2 178,5	1 702,8	618,4
Ca	25 726,7	25 726,3	28 126,3
Cc	3 425,2	3 425,1	7 012,1
Ct	44 152,7	44 153,3	47 257,8
Ctc	14 619,1	14 626,6	8 407,7
Cr	9 732,0	9 732,7	21 179,0
Cm	7 270,1	7 743,8	11 529,1
Tp	2 236,3	2 236,9	819,0
Ts	5 470,8	5 472,0	5 206,0
G	25 820,5	25 808,3	27 709,3
La	5 297,7	5 297,1	5 112,6
Lu	4 531,0	4 529,3	4 252,4
Fp	3 162,8	3 159,9	2 260,9
FA	6 511,5	6 511,4	5 187,8
FJ	0,0	0,0	0,0
FR	2 399,7	2 398,5	1 444,2
Fam	14 566,9	14 567,8	11 575,9
FJm	731,7	731,6	603,7
FRm	988,5	989,5	974,4
Fas	9 240,7	9 240,5	13 812,5
FJs	342,3	342,7	600,1
FRs	205,5	205,9	234,8
W	8 999,1	9 004,0	16 590,2
WdS	44 674,9	44 680,4	20 188,3
Cl	825,6	825,4	786,7
Sh	–	–	1 439,4
Total	243 109,8	243 111,8	242 928,6

6 Ergebnis

6.1 Statistische Verteilung der Flächennutzungen

Tabelle 1 zeigt die Flächenanteile der verschiedenen Flächennutzungen (natürliche Vegetation und Landnutzung) und stellt die Ergebnisse der Bestimmungsverfahren einander gegenüber. Auf den verschiedenen Klassifikationsebenen ergeben sich, mit der Hierarchieebene ansteigend, unterschiedliche Übereinstimmungsniveaus der Flächenstatistiken. Auf unterster Ebene (Level III) sind dies 67%, auf der mittleren Ebene (Level II) 74% und auf oberster Ebene (Level I) beträgt die statistische Übereinstimmung mit der visuellen Interpretation 84% des gesamten Untersuchungsgebietes.

6.2 Räumliche Verteilungsmuster der Flächennutzungen – visuelle Überprüfung

Zur visuellen Überprüfung der Klassifikationsergebnisse stehen zwei Karten (Beilage IV) im Maßstab 1:250 000 zur Verfügung. Sie zeigen die Flächennut-

zung auf unterster Klassifikationsebene. Folgendes lässt sich im Vergleich feststellen:

- Trotz des Majoritätsfilters wirkt die rechnergestützte Klassifikation wesentlich differenzierter als die Luftbildinterpretation. Dies kann als Folge stärkerer Generalisierung der Luftbildinterpretation gewertet werden.

- Die groben räumlichen Flächennutzungsstrukturen, wie z. B. Schwerpunkträume des Weidelandes, Waldverteilung etc. besitzen nach beiden Methoden eine gute Übereinstimmung.

- Bei der rechnergestützten Klassifikation macht sich das Zonenkonzept durch teilweise abrupte Flächennutzungswechsel entlang der Grenzen bemerkbar. Dies kann als Folge der je nach Klasse sehr schwierigen Trainingsgebietsauswahl angesehen werden.

6.3 Overall, Producer's und User's Accuracy

Neben dem Vergleich der Flächennutzungsstatistiken und dem Vergleich auf Pixelbasis können zur Fehlerabschätzung bzw. -analyse die bereits erwähnten

Tabelle 2: Overall Accuracy (Level I, II und III), Durchschnitt der Producer's und User's Accuracy (Level III) der einzelnen Zonen

Overall accuracy (Level I, II and III), average of producer's and user's accuracy (Level III) of individual zones

Zone	Overall III [%]	Overall II [%]	Overall I [%]	Durchschnitt der Prod's III [%]	Durchschnitt der User's III [%]	Klassen- anzahl III	Fläche [km ²]
Escarpment	78	81	86	75	75	13	815
Magamba	80	83	90	77	82	19	311
Manolo	94	96	97	85	93	12	70
Mlalo	78	87	90	73	81	17	222
Mlola	87	89	91	81	90	9	239
Shume	73	83	87	70	76	17	361
Soni-Lushoto	71	79	87	69	75	21	413
Westusambara Berge	78	84	89	76	78	25	2431

Error-Matrizen hinzugezogen werden (CONGALTON 1991, 35). Wie schon ausgeführt, gibt die Overall Accuracy bei der Auswahl von Test- oder Trainingsgebieten das Verhältnis der Gesamtheit der richtig klassifizierten Pixel aller Klassen zur Gesamtheit aller ausgewählten Pixel wieder. Unterstellt man der Auswahl der Trainingsgebiete, dass für häufige Flächennutzungen auch mehr Trainingsgebiete ausgewählt werden müssen, so ist die Overall Accuracy auch eine, nach der Häufigkeit der Flächennutzung ungefähr gewichtete Größe, was im Vergleich zu den nun folgenden Größen Berücksichtigung finden sollte.

Als weitere Bewertungsgröße können noch die Producer's Accuracy und die User's Accuracy aus den Matrizen abgeleitet werden (CONGALTON 1991, 37). Die Producer's Accuracy ist das Verhältnis aller richtig klassifizierten Testpixel der Referenzklasse zur Gesamtheit aller ausgewählten Testpixel der Referenzklasse. Damit lässt sich ausdrücken, wie gut eine Klasse definiert bzw. klassifiziert wurde. Die User's Accuracy hingegen ist das Verhältnis aller richtig klassifizierten Testpixel der Referenzklasse zur Gesamtheit aller Pixel aus allen Klassen, die zur Referenzklasse klassifiziert worden sind. Damit wird ausgesagt, wie sicher ein Pixel zu der Klasse gehört, zu der es klassifiziert worden ist.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in den Zonen jeweils erzielten Overall Accuracy's in den verschiedenen Klassifikationsebenen, der Producer's und User's Accuracy auf Level III. Festzustellen ist,

- dass nach der Overall Accuracy die erzielte Genauigkeit der Klassifikation den Anforderungen von ANDERSON et al. (1976) weitgehend genügt (84% auf Level II),

- dass die Producer's Accuracy meist kleiner ist als User's und Overall Accuracy, was u. a. als Folge der Klassengewichtung im Klassifikationsprozess gewertet werden kann und,

- dass die Unterschiede zwischen den Zonen auf Flächengröße und Anzahl der in den Zonen vertretenen Klassen, also der Flächennutzungsheterogenität einer Zone, zurückzuführen ist.

6.4 Versuch einer Fehleranalyse – die Error-Matrizen

Eine wichtige Datenquelle zur Analyse sind die Error-Matrizen. Sie können Aufschluss über den Charakter von Fehlklassifikationen liefern. Allerdings sollten sie in der Aussage nicht überbewertet werden, da es sich im vorliegenden Fall lediglich um die Klassifikationen innerhalb der Trainingsgebiete handelt. Tabelle 3 fasst das Ergebnis zusammen, hierbei werden nur die anteilmäßig größeren Fehluweisungen berücksichtigt. Neben den Error-Matrizen können die Flächenstatistiken der Klassifikationsmethoden zur Analyse herangezogen werden. Die Steigerung der Übereinstimmungen beider Verfahren mit dem Übergang zu höheren Klassifikationsebenen lässt sich beim Übergang von Level III zu Level II im wesentlichen mit dem Zusammenführen der Ackernutzungsklassen erklären, da die Ackernutzungen zum einen eine große Gruppe darstellen und zum anderen durch das Zonierungskonzept die Waldtypen nur wenig streuen (Level III der Naturlandschaftsklassen differenziert die Waldtypen). Die Steigerung von Level II zu Level I hingegen ist als Folge der Zusammenfassung der Walddegradationsstufen und der Niedrigen Gehölzformationen zu sehen.

7 Diskussion

Abschließend sollen die wichtigsten Fehlerquellen zusammenfassend aufgezeigt und vergleichend diskutiert werden (vgl. auch SCHARDT 1990, 107–108).

Tabelle 3: *Producer's and User's Accuracy (Level III), sowie Fehlklassifikationen der einzelnen Klassen*
 Producer's and user's accuracy (Level III) and misclassifications of the individual classes

Klasse	Prod's	User's	Fehlzuweisungen	Bemerkungen
S	54	95	Ca, Ct, G	hoher Mischpixelanteil, keine ländlichen Siedlungen, Vorauswahrscheinlichkeit
Ca	86	82	Ct, Cc, Cr, G	Problemlose Trainingsgebietsauswahl
Cc	72	71	Ct, Ctc	Schwierige Detektion der Makrokonturen
Ct	77	72	Ca, Cr, Cc, Ctc, G, Cm, WdS	Fehlzuweisungen zu vielen Klassen, da Laubbäume in zahlreichen Klassen vorkommen
Ctc	65	77	Ct, Ca, Cc, G, La	Zonierung reduziert Anzahl der Fehlzuweisungen gegenüber Ct. Vorauswahrscheinlichkeit
Cr	73	75	Ct, Ca, G, WdS, W	Unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkt verursacht große Differenz der beiden Kartierungen
Cm	63	71	Ct, Ts, FAs, WdS, Fr	Zonierung reduziert Anzahl der Fehlzuweisungen; Vorauswahrscheinlichkeit
Tp	84	89	Ts, Ct	Schwierige Trainingsgebietsauswahl, da zahlreiche Aspekte zu berücksichtigen sind
Ts	74	75	Cm, Ct, La, Fas, Tp	Heterogene Klassendefinition
G	88	85	Ca, Ct, Cr, WdS	gute Übereinstimmung der Flächenstatistik
La	74	70	Lu, FAs, WdS, Ct	
Lu	68	67	La, WdS, FAs, Ct	Stärkere Heterogenität als La
Fp	82	84	FAs, FAm, FA, FRm	Flächengröße unterschätzt, da nicht jeder Aspekt im Trainingsgebiet erfasst werden kann und junge Aufforstungen Ackernutzungsklassen zugewiesen werden
FA	82	81	FAm, Fp, Fas	
FR	67	64	FAm, FRm, Fas, W	
FAm	76	78	FAs, W, FA, FR	
FJm	96	97	FJs, Fp	sehr homogene Naturlandschaftsklasse, insgesamt geringe Klassenanzahl in dieser Zone
FRm	74	54	FAm, FR, Fas, W	
FAs	80	79	FAm, La, FA, Fp, WdS	
FJs	96	96	FJm	sehr homogene Naturlandschaftsklasse, insgesamt geringe Klassenanzahl in dieser Zone
FRs	96	96	FJm	
W	80	76	WdS, CT, Fam, G, FRm	Flächengröße in RK überschätzt, da räumlicher Zusammenhang nicht in RK einfließt
WdS	80	79	Ct, W, G, Cm., Cr, FAm, La, Lu	sehr heterogen, zahlreiche Mischpixel
Cl	81	88	La, WdS, G, Ct	Vorauswahrscheinlichkeit

7.1 Visuelle Interpretation

– *Interpretationsfehler*: Abhängig vom Bildmaterial (CIR-, BW-Luftbilder, Satellitenbild) und Bildmaßstab können sich qualitative und quantitative Fehlinterpretationen unterschiedlichen Ausmaßes ergeben. Besondere Schwierigkeiten bereiten sehr heterogene und variabel gehaltene Klassen.

– *Generalisierungsfehler*: In einem kleinräumig und intensiv genutzten Raum, wie den West Usambara Bergen, tritt ein dichtes, kleinparzelliertes und heterogenes Nutzungsgefüge auf. Der angestrebte Darstellungsmaßstab macht eine Generalisierung notwendig, die zwar die Lesbarkeit der Karte erhöht, gleichzeitig das Ergebnis zumindest leicht verfälscht. Insbesondere

beim Vergleich der beiden Klassifikationen auf Pixel-ebene muss die exakte pixelgenaue Übereinstimmung von nur 31% auf diesen Fehler zurückgeführt werden. Ein Abgrenzen von Landnutzungen in der visuellen Interpretation mit der räumlichen Auflösung von 25 m x 25 m hätte im Kartiermaßstab (1:25 000) Flächen-dimensionen von 1 mm x 1 mm zur Folge.

– *Abgrenzungsfehler*: Bei Klassen mit gemeinsamen definierenden Elementen, jedoch unterschiedlichen quantitativen Anteilen derselben (z. B. unterschiedlich stark degradierte Waldklassen, Ackernutzungsklassen), kommt es in räumlicher Nachbarschaft zu Abgrenzungsfehlern, da die Grenzen eher einen sanften Übergang als einen deutlichen Wechsel darstellen.

– *Land use contra Land cover*: Die Kartierung der

Flächennutzung (land use) erfasst nicht nur physiognomische Aspekte, so daß es zum Konflikt zwischen physischem Aufbau und tatsächlicher Nutzung kommen kann (z. B. Weideland – Buschland).

– *Lagefehler*: In der Aufnahme der Landnutzung kommt es durch Lagefehler der Kartiergrundlage (Orthophotos) und der weiteren Bearbeitung (Folie) zu Verschiebungen und Verzerrungen, die sich auf den Vergleich mit dem Satellitenbild auswirken können.

– *Rasterfehler*: Zum Vergleich der beiden Klassifikationsergebnisse war eine Aufrasterung der ursprünglichen Vektordatenbasis der Luftbildinterpretation notwendig. Dies kann entlang der Grenzen von Flächennutzungen zu anschließenden Fehlern im Vergleich der beiden Ergebnisse führen.

7.2 Rechnergestützte Klassifikation

– *Trainingsgebietsauswahl*: Zentrales Problem der rechnergestützten Klassifikation ist die Auswahl der Trainingsgebiete nach Anzahl, Größe und Repräsentativität. Gerade in einem stark reliefierten und im Nutzungsgeflecht kleinräumig strukturierten Raum ist die Auswahl schwierig. Zahlreiche Mixel statt klar bestimmter Pixel bestimmen das Bild.

– *Spektrale Differenzierung und Zusatzlayer*: Die spektrale Differenzierung der einzelnen Klassen ist nicht in allen Fällen ausreichend, um die eigentliche Landnutzung zu beschreiben. Nichtspektrale Zusatzlayer erweitern die Klassifikationsmöglichkeiten und reduzieren Fehlklassifizierungen. Zur Anwendung kamen Zusatzlayer der Hangneigung, des Reliefschattens, der Textur und ein Vegetationsindex (NDVI). Ferner konnte die spektrale Differenzierung durch ein ökofloristisches, agroökologisches Zonierungskonzept verbessert werden.

– *Aufbereitungsfehler*: Digitale Satellitendaten müssen vor ihrer Klassifikation einer Korrektur der Einflüsse von Atmosphäre und Topographie unterzogen werden. Während die atmosphärische Korrektur in dieser Satellitenszene aufgrund sehr guter Aufnahmebedingungen problemlos ist, ist der Einfluss der Topographie erheblich und damit auch der Korrekturaufwand. Es zeigt sich, daß das Verfahren der Topographischen Normalisation (Lambertsches Reflexionsmodell) dem manuellen Auswählen von Schatten- und Sonnenhängen, unterstützt von einem Reliefschattenlayer, unterlegen ist.

– *Klassenanzahl*: Mit der Klassenanzahl steigen die Möglichkeiten der Fehlklassifikationen, denn die Trainingsgebiete treten verstärkt miteinander in Konkurrenz. Relativ homogene und kleine Zonen mit wenigen Klassen erzielen bessere Ergebnisse als große heterogene Zonen.

– *Aufnahmezeitpunkt*: Die Aufnahme der Satellitenszene erfolgte rund ein halbes Jahr später als die Luftbildaufnahmen. Sie fand damit in einer anderen Phase des landwirtschaftlichen Anbaus statt. Zusätzlich kam es zu einer Besonderheit, da die kleine Regenzeit ausgefallen war und damit der landwirtschaftliche Rhythmus gestört wurde. Des Weiteren fand die Geländebereisung zwar ein Jahr später, aber zum gleichen phänologischen Zeitpunkt wie die Luftbildbefliegung statt. Daher muß, insbesondere für die annuellen Ackerbauklassen, die Auswertung der Satellitenszene andere Ergebnisse liefern.

– *Lagefehler*: Analog den Lagefehlern der Kartierbasis der Luftbildinterpretation treten Lagefehler der orthorektifizierten Satellitenszene auf. Der erzielte RMSE beträgt 1,03 Pixel.

7.3 Vergleich: Visuelle Interpretation – Rechnergestützte Klassifikation

Es stellt sich abschließend die Frage nach der Bewertung der Ergebnisse und damit der Eignung der verschiedenen Erhebungsmethoden unter den Bedingungen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel der West Usambara Berge vorgefunden wurden. Vor zwei Jahrzehnten konstatierte LÖFFLER (1981) bezüglich der damaligen rechnergestützten Klassifikationen (Landsat-MSS Aufnahmesystem): „In komplexen Naturlandschaften und vor allem in solchen mit deutlichem Relief sind derartige Klassifizierungen bisher wenig erfolgreich.“ HOWARD a. LANTIERI (1987) stellen in ihrer Studie (SPOT-Aufnahmesystem) fest: „Digital classification is less reliable than photo-interpretation of digitally enhanced colour composites.“

SAXENA et al. (1992) betrachten das Eignungsproblem in ihrer Untersuchung (Landsat-TM-Aufnahmesystem) differenziert und sprechen der visuellen Interpretation im Hinblick auf ein Nutzungsmanagement von tropischen Waldgebieten auf der Artenebene (Level III) eine bessere Eignung zu. Wohingegen bei Planungsaufgaben zu Schutzvorhaben von Waldgebieten die rechnergestützte Klassifikation befriedigende Ergebnisse liefert (vgl. auch ANHUF 1997). ROY et al. (1991) erzielen mit der automatischen Klassifikation (Landsat-TM) deutlich bessere Ergebnisse als durch Luftbildinterpretation. Hierbei handelt es sich allerdings um ein relativ kleines Untersuchungsgebiet (Andaman Inseln, 967 km²) und insgesamt nur neun Klassen, davon sieben Waldklassen. HÖNSCH (1993) kommt zu dem Schluss, dass Kontextwissen (a priori-Wissen) immer noch am besten in der visuellen Interpretation Einfluss finden kann.

Aus diesen Aussagen und den in dieser Arbeit gemachten Erfahrungen lässt sich der Schluss ziehen, daß die visuelle Interpretation längst nicht „zum alten Eisen“ gezählt werden kann. Für eine erfolgreiche rechnergestützte Klassifikation müssen mehrere untersuchungsgebietsspezifische Bedingungen erfüllt sein. Dies sind nach RASMUSSEN (1993): einfache Landnutzungsmuster und wenige Ackerkulturen; starker spektraler Kontrast zwischen Ackerkulturen und natürlicher Vegetation; ebene Topographie; wolkenfreie Tage während der Wachstumszeit sowie relativ große und regelmäßige Felder, Gemengelagen mit scharfen Grenzen.

Im Falle der West Usambara Berge sind gleich mehrere dieser Voraussetzungen nicht erfüllt. Zahlreiche Klassen mit geringem spektralem Kontrast, komplexe und kleinparzellige Nutzungsgefüge sowie ein stark bewegtes Relief erschweren die rechnergestützte Klassifikation. Unter der Annahme, dass die visuelle Interpretation die „ground truth“ darstellt und unter den dargestellten gebietsspezifischen Voraussetzungen, fällt das Ergebnis der automatischen Klassifikation mit einer pixelgenauen Übereinstimmung von 31% (Level III) trotz der gegensteuernden Maßnahmen (Zonierung, Zusatzlayer) erwartungsgemäß ernüchternd aus. Gleichzeitig muss die Luftbildinterpretation als „ground truth“, wie oben gezeigt, zumindest in Grenzen in Frage gestellt werden. Die Overall Accuracy von 78% (Level III) gibt Grund zu der Annahme, dass die Übereinstimmung mit der „ground truth“ (nicht die Luftbildinterpretation) höher liegen kann. Dies berechtigt dann wiederum zu der Aussage, dass mit der rechnergestützten Klassifikation zumindest auf der mittleren Hierarchieebene der Klassifikation (Level II) ein zufriedenstellendes Ergebnis erwartet werden kann.

8 Ausblick

Die gewonnenen Erfahrungen aus dieser Arbeit zeigen, dass zur Steigerung des rechnergestützten Klassifikationsergebnisses weniger die zukünftig zu erwartenden besseren räumlichen und spektralen Auflösungen der Aufnahmesysteme beizutragen vermögen, sondern die Integration des Kontextwissens und räumlicher Modelle in den Klassifikationsvorgang entscheidende Verbesserungen erzielen werden. Die Fragen nach der Funktionsweise einer Landschaft und die Implementierung ihrer räumlichen Modelle in Geographische Informationssysteme werden verstärkt berücksichtigt werden müssen. Ansätze hierzu liefern Expertensysteme wie sie LE BER (1995) am Beispiel einer Agrarlandschaft zeigt. Die Verknüpfung von „Fernerkundungs-

daten und Gelände“ wird weiterhin eine zentrale Aufgabe des Geographen sein.

Danksagung

Die Geländearbeiten und die Luftbilddauswertung fanden im Zusammenhang mit einer Landnutzungs- und Vegetationskartierung der West Usambara Berge (Nord Tansania) im Rahmen des „Resource Protection and Bufferzone Development Programme“ des Tanzanian Ministry for Natural Resources and Tourism statt. Das Projekt wurde von der GAF (Gesellschaft für angewandte Fernerkundung mbH), München im Auftrag der KfW durchgeführt. Für die Unterstützung vor Ort danken wir den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des SECAP Projects, insbesondere der stellvertretenden Projektleiterin Frau Gabi Zink und unserem Counterpart Herrn Gaudens Kilasi.

Literatur

- ATTEMS, M. (1967): Bauernbetriebe in tropischen Höhenlagen Ostafrikas – Die Usambara-Berge im Übergang von der Subsistenz- zur Marktwirtschaft. Afrika-Studien Nr. 25, München.
- BANNARI, A.; MORIN, D. a. BONN, F.(1995): A review of vegetation indices. In: Remote Sensing Reviews 13, 95–120.
- CHAVEZ, P. S. jr. (1988): An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. In: Remote Sensing of Environment 24, 459–479.
- (1996): Image-based atmospheric corrections – revisited and improved. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 62, 1025–1036.
- CONGALTON, R. G. (1991): A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. In: Remote Sensing of Environment 37, 35–46.
- CRIST, E. P. a. KAUTH, R. J. (1986): The Tasseled Cap demystified. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 52, 81–86.
- ERDAS INCORPORATION (41997): ERDAS field guide. Atlanta.
- EZAZA, W. (1985): Untersuchung über die Problematik landwirtschaftlicher Nutzung in tropischen Gebirgen Ostafrikas unter besonderer Berücksichtigung geökologischer Faktoren – dargestellt am Beispiel des Dorfgebietes UBIRI im Lushoto-District in den Usambara Bergen / Tansania. Diss. Gießen.
- HELBERG, U. (1989): Zur Akzeptanz von Erosionsschutzmaßnahmen. Der Tropenlandwirt Beiheft 39, Kassel.
- HILL, J. a. STURM, B. (1991): Radiometric correction of multi-temporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. In: International Journal of Remote Sensing 12, 1471–1491.

- HOFFER, R. M. (1978): Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: SWAIN, P. a. DAVIS, S. M. (Ed.): Remote sensing: the quantitative approach. New York, 227–289.
- HÖNSCH H. (1993): Erfassung und Klassifizierung von tropischen Regenwaldformationen und anthropogenen Nutzungen anhand von multisensoralen Satellitenbilddaten am Beispiel Brasiliens. DLR Forschungsbericht, Oberpfaffenhofen.
- HOWARD, J. A. a. LANTIERI, D. (1987): Vegetation classification, land systems and mapping using SPOT multispectral data – preliminary results. In: CNES: Proceedings of SPOT 1 first in-flight results. Toulouse, 137–149.
- ITTEN, K. I.; MEYER, P.; KELLENBERGER, T.; LEU, R.; SANDMEIER, St.; BITTER, P. a. SEIDEL, K. (1992): Correction of the impact of topography and atmosphere on Landsat-TM forest mapping of alpine regions. Remote Sensing Series Vol. 18, Zürich.
- JUSTICE, C. O.; WHARTON, S. W. a. HOLBEN, B. N. (1981): Application of digital terrain data to quantify and reduce topographic effect on Landsat data. In: International Journal of Remote Sensing 2, 213–230
- KAONEKA, A. R. S. (1993): Land use planning and quantitative modelling in Tanzania with particular reference to agriculture and deforestation: some theoretical aspects and a case study from the West Usambara Mountains. Doctor scientiarum Thesis 12, Department of Forestry, Agricultural University of Norway.
- KAONEKA, A. R. S. a. SOLBERG, B. (1994): Forestry related land use in the West Usambara mountains, Tanzania. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 49, 207–215.
- KRAUS, K. (1979): Zur Theorie der Klassifizierung multispektraler Bilder. In: Bildmessung und Luftbildwesen 47, 119–128.
- LE BER, F. (1995): A prototype model-based expert system for agricultural landscape analysis. In: AI Applications 9, 91–101.
- LÖFFLER, E. (1981): Landsat-Bilder als Hilfsmittel geographischer Forschung – Möglichkeiten und Grenzen. In: Die Erde 112, 11–31.
- (1994): Geographie und Fernerkundung. Stuttgart.
- LUNDGREN, L. a. LUNDGREN, B. (1979): Rainfall, interception and evaporation in the Mazumbai Forest Reserve, West Usambara Mts., Tanzania and their importance in the assessment of land potential. In: Geografiska Annaler 61 A, 157–178.
- MOREAU, R. E. (1935): A synecological study of Usambara, Tanganyika Territory, with particular reference to birds. In: Journal of Ecology 23, 1–43.
- MWIHOMEKE, S. T. (1987): Agroforestry for the densely populated Tanzanian highlands. Thesis for Magister in Scientia, University College of North Wales, Department of Forestry and Wood Science, Bangor.
- ORTHABER, H. (1997): Beleuchtungsmodell und topographische Korrekturfehler durch unexakte Sonnenpositionsdaten. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 65, 11–21.
- PRINZ, D. (1982): Ökologisch angepaßte Bodennutzung in den Usambara-Bergen Tansanias. In: HAFFNER, W. (Hrsg.): Tropische Gebirge: Ökologie und Agrarwirtschaft. Gießener Beiträge zur Entwicklungsforschung Reihe I, Bd. 8, Gießen, 155–162.
- RASMUSSEN, K. (1993): Status on satellite remote sensing of environment and agriculture in African drylands. In: ADRIANSEN, H. K. a. RASMUSSEN, K. (Ed.): Proceedings from the seminar on satellite remote sensing of environment and agriculture in developing countries. Geographica Hafniensia, C1 Kopenhagen.
- ROY, P. S.; RAGANATH, B. K.; DIWAKAR, P. G.; VOHRA, T. P. S.; BHAN, S. K. SINGH, I. J. a. PANDIAN, V. C. (1991): Forest type mapping and monitoring using remote sensing. In: International Journal of Remote Sensing 12, 2205–2225.
- SAN MIGUEL-AYANZ, J. a. BIGING, G. S. (1986): An iterative classification approach for mapping natural resources from satellite imagery. In: International Journal of Remote Sensing 17, 957–981.
- SAXENA, K. G.; TIWARI, A. K.; PORWAL, M. C. a. MENON, A. R. R. (1992): Vegetation maps, mapping needs and scope of digital processing of Landsat Thematic Mapper data in a tropical region of south-west India. In: International Journal of Remote Sensing 13, 2017–2037.
- SCHARDT, M. (1990): Verwendbarkeit von Thematic Mapper-Daten zur Klassifizierung von Baumarten und natürlichen Altersklassen. Forschungsbericht Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt DLR-FB 90–44, Oberpfaffenhofen.
- SHACKELTON, R. (1993): Tectonics of the lower crust: A view from the Usambara Mountains, NE Tanzania. In: Journal of Structural Geology 15, 663–671.
- SICK, W.-D. (1993): Agrargeographie. Braunschweig.
- TEILLET, P. M. (1986): Image correction for radiometric effects in remote sensing. In: International Journal of Remote Sensing 7, 1637–1651.
- THOMPSON, M. (1996): A standard land-cover classification scheme for remote-sensing applications in South Africa. In: South African Journal of Science 92, 34–42.
- TIRDEP (1980): Land Use Atlas – Land Use Survey Tanga Region. Airphoto Interpretation Projekt. Tanga.
- WOYTEK, R.; BÄHRING, A.; DERSCH, D.; HABERMEHL, J.; KAUFMANN, P.; KÖNEMUND, G. a. WEITZ, M. (1987): Soil erosion control and agroforestry in the West Usambara mountains. Seminar für Landwirtschaftliche Entwicklung TU Berlin.

Systemkorrigierte und orthorektifizierte Landsat TM Szene WRS 167/63 vom 28. 01. 1997 – Bandkombination ist 4, 5, 3 (R, G, B)
 Bearbeitung und mit freundlicher Genehmigung durch die GAF, München

Digitally enhanced and rectified Landsat TM Scene (WRS 167/63) from the 28. 01. 1997 – Band combination is 4, 5, 3 (R, G, B)
 Image enhancement and permission to publish by GAF, München

Beispiele von CIR-Luftbildern mit visuell festgelegten Landnutzungs- und Vegetationsgrenzen
 (Buchstabenkürzel vgl. Text und Beilage IV)

Examples of the CIR aerial photographs used for visual mapping of land use and land cover
 (letters indicate the classes as explained in the text and in the legends of supplement IV)



a
 Intensiv genutzte Hanglagen in den Inneren Usambaras mit hangparallelen Makrokonturen, die durch Baum- und Strauchreihen akzentuiert sind (Ctc). Felder sind teils abgeerntet (grünlich), teils mit Maisbeständen (rot). In den Talböden Bewässerungsfeldbau mit Gemüse (Ca)

Intensive land use on sloping land in the central Usambara Mts with Macrocontours as erosion control measure (Ctc). The Macrocontours are accentuated by lines of trees and shrubs. In some fields the stable crop maize has already been harvested (greenish) in others it still covers the ground (red). In the valley floors cultivation of vegetables with the aid of irrigation (Ca)



b
 Permanenter Anbau mit Elementen traditioneller Subsistenzwirtschaft. Im Bildzentrum ein traditionelles Multistorey-cropping-System mit hohen Nutzbäumen, darunter Bananen und Kaffee (Cm)

Permanent cropping with elements of traditional subsistence agriculture. In the centre multi-storey cropping with bananas and coffee as understory and high trees providing shade



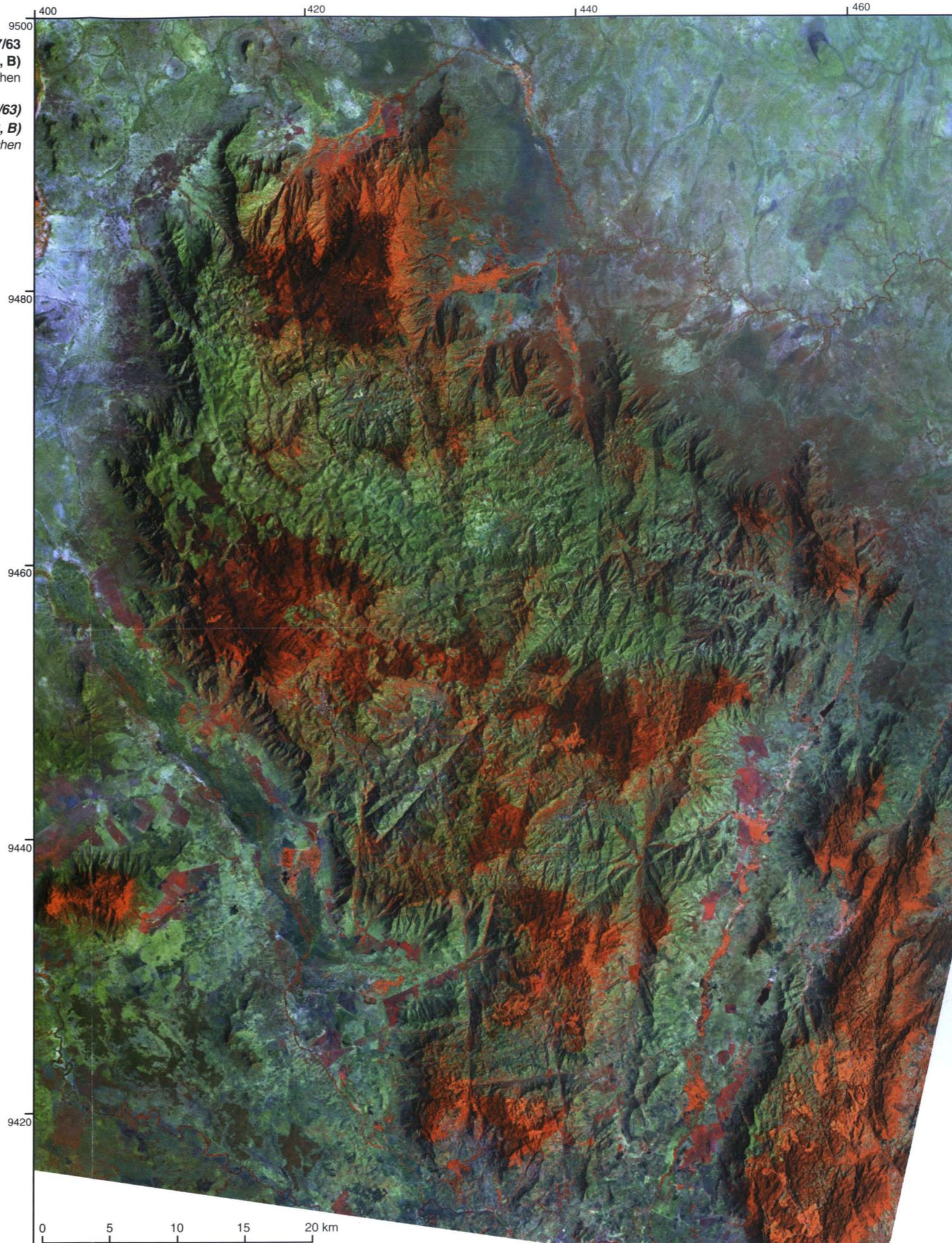
c
 Teeplantage (einheitliches Rosa) (Tp), umgeben von Beständen mit Eukalyptusbäumen (kräftiges Rot) (Lu) und Resten von Afromontane forest (FAM)

Teaplantation (uniform pink) (Tp) surrounded by woodlots of Eucalyptus trees (bright red) and patches of degraded Afromontane forest (FAM)



d
 Degradierte Waldbestände (Afromontane forest) oberhalb 1500 m (FAM, FAs). Ein Streifen hoher, noch zur britischen Kolonialzeit gepflanzter Eukalyptusbäume begrenzt den Wald gegen das Ackerland, das durch Maisanbau gekennzeichnet ist (Ca, Ct, Cm). Innerhalb des Ackerlands größere Bestände der Gerberakazie (kräftiges Rot) (La)

Degraded Afromontane forest above 1500m (FAM, FAs). Rows of high Eucalyptus trees planted in the British colonial time clearly delineate the forest. In the fields maize is the dominant crop (Ca, Ct, Cm) and black wattle woodlots are scattered throughout



Landnutzung und Vegetation der West Usambara Berge (NO-Tansania)

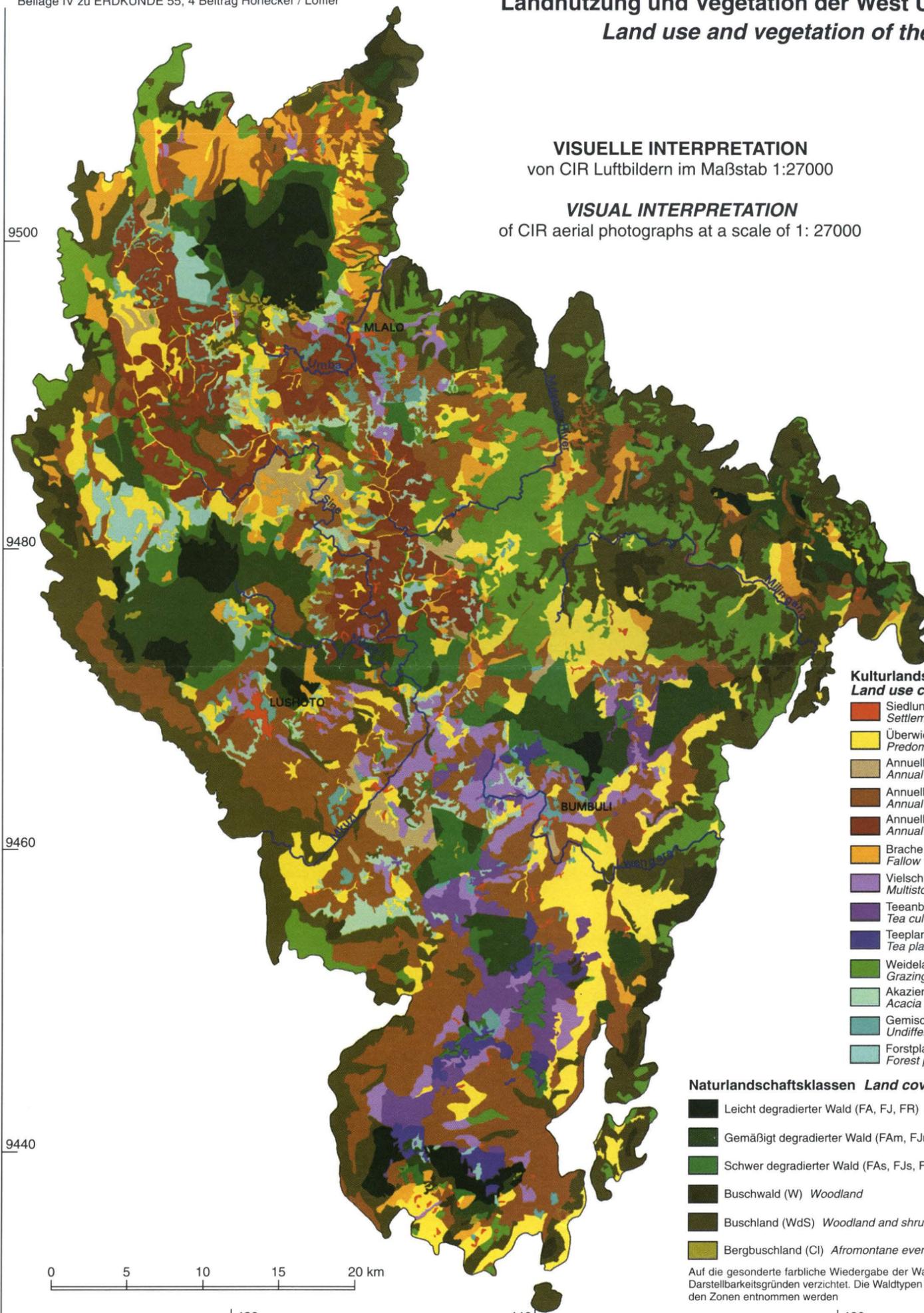
Land use and vegetation of the West Usambara Mts

VISUELLE INTERPRETATION
von CIR Luftbildern im Maßstab 1:27000

VISUAL INTERPRETATION
of CIR aerial photographs at a scale of 1: 27000

RECHNERGESTÜTZTE KLASSIFIKATION
der Landsat TM Daten

AUTOMATIC CLASSIFICATION
of Landsat TM data



Kulturlandschaftsklassen
Land use classes

- Siedlungen (S)
Settlements
- Überwiegend annueller Ackerbau (Ca)
Predominantly annual crops
- Annueller Ackerbau mit Makrokonturen (Cc)
Annual crops with macrocontours
- Annueller Ackerbau mit Bäumen (Ct)
Annual crops with scattered trees
- Annueller Ackerbau mit Bäumen und Makrokonturen (Ctc)
Annual crops with trees and macrocontours
- Brache (Cr)
Fallow
- Vielschichtige Mischkultur (Cm)
Multistorey cropping system
- Teeanbau der Kleinbauern (Ts)
Tea cultivation by smallholders
- Teeplantagen (Tp)
Tea plantation
- Weideland (G)
Grazing land
- Akazien-Waldparzellen (La)
Acacia woodlot
- Gemischte Waldparzellen (Lu)
Undifferentiated woodlot
- Forstplantagen (Fp)
Forest plantation

Naturlandschaftsklassen **Land cover classes**

- Leicht degradiertes Wald (FA, FJ, FR) *Slightly degraded forest*
- Gemäßigt degradiertes Wald (FAM, FJM, FRM) *Moderately degraded forest*
- Schwer degradiertes Wald (FAs, FJs, FRs) *Severely degraded forest*
- Buschwald (W) *Woodland*
- Buschland (WdS) *Woodland and shrubland*
- Bergbuschland (Cl) *Afromontane evergreen bushland and thicket*

- Fluss *River*
- Schatten (Sh) *Shadow*

Auf die gesonderte farbliche Wiedergabe der Waldtypen wurde aus Darstellbarkeitsgründen verzichtet. Die Waldtypen können weitgehend den Zonen entnommen werden

Because of the small scale the various forest types are not differentiated in colours. The forest types are, however, shown on the map of agricultural zones

