

Ilona Grünberg

Extraktion von Siedlungsflächen auf Basis von Daten des Radarsatelliten TerraSAR-X

Untersuchungsgebiet – Mataram

Lombok ist eine Insel in Indonesien und liegt in der Provinz Nusa Tenggara Barat. Sie besitzt eine Fläche von 4.725 km². **Mataram** ist die Hauptstadt der Provinz West Nusa Tenggara. (Abbildung 1)

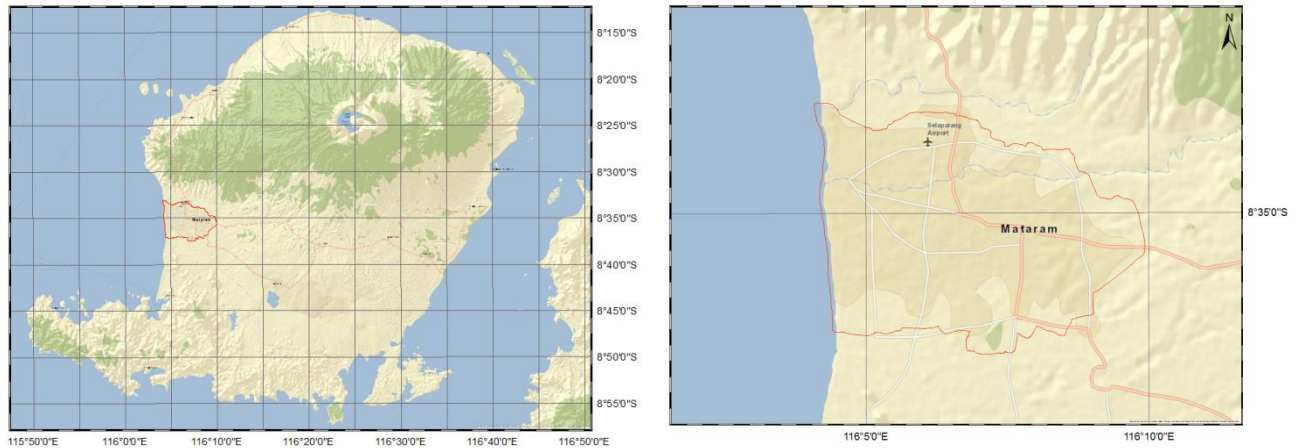


Abbildung 1: Übersichtskarte Insel Lombok (links) und des Untersuchungsgebietes Mataram

Wesentliche charakteristische Merkmale des Untersuchungsgebietes sind:

- großes zusammenhängendes Stadtgebiet mit kleinen umliegenden Siedlungen
- flaches Gelände
- Baumreihen als Feld- und Uferbegrenzung
- von Bäumen umgebene kleine Siedlungen
- Reisanbauflächen in unterschiedlichen Wachstumsperioden.

Dies bringt folgende Vorteile für eine Siedlungsklassifizierung mit Satellitenradar:

- topographische Einflüsse können vernachlässigt werden (flaches Gelände)
- große Anzahl an starken Rückstreusignalen

Dem stehen folgende Nachteile für die Siedlungsextraktion (Ursachen der Artefakte) gegenüber:

- Darstellung der Siedlungen in den Szenen nicht flächendeckend (Rückstrahlverhalten von Gebäuden, Schattenwurf)
- Volumenstreuung durch Vegetation (starke Rückstreuung möglich)
- hohe Intensitätswerte durch Baumreihen und Einzelbäumen (Rückstreuverhalten wie an Gebäuden)

Datengrundlage

Es wurden zwei TerraSAR-X-Szenen im Format SSC (Single Look Slant Range Complex) verwendet. Eine Szene liegt im Ascending Modus und die andere im Descending Modus vor.

Beide Szenen weisen aufgrund der Aufnahme­richtung unterschiedlich beleuchtete Gebiete auf. Das bringt für die Siedlungsextraktion den Vorteil, dass Siedlungsstrukturen, welche in einer TerraSAR-X-Szene kaum sichtbar waren (Schattengebiete) in der anderen Szene eine starke Intensität aufweisen. (Abbildung 2)

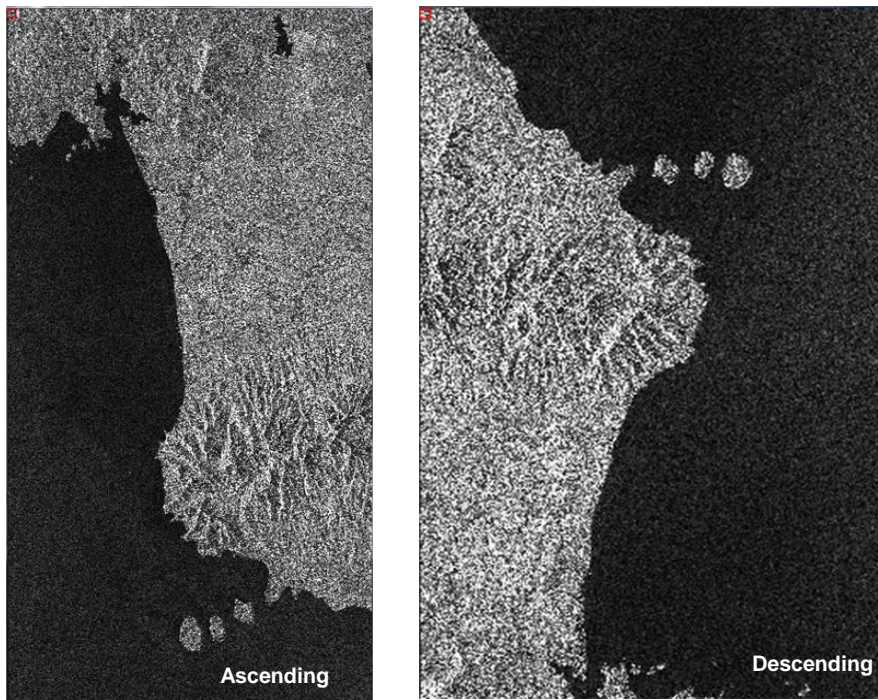


Abbildung 2: Die in der Studie verwendeten TerraSAR-X-SSC-Szenen vor der Georeferenzierung, im Ascending Modus (links) und Descending Modus (rechts).

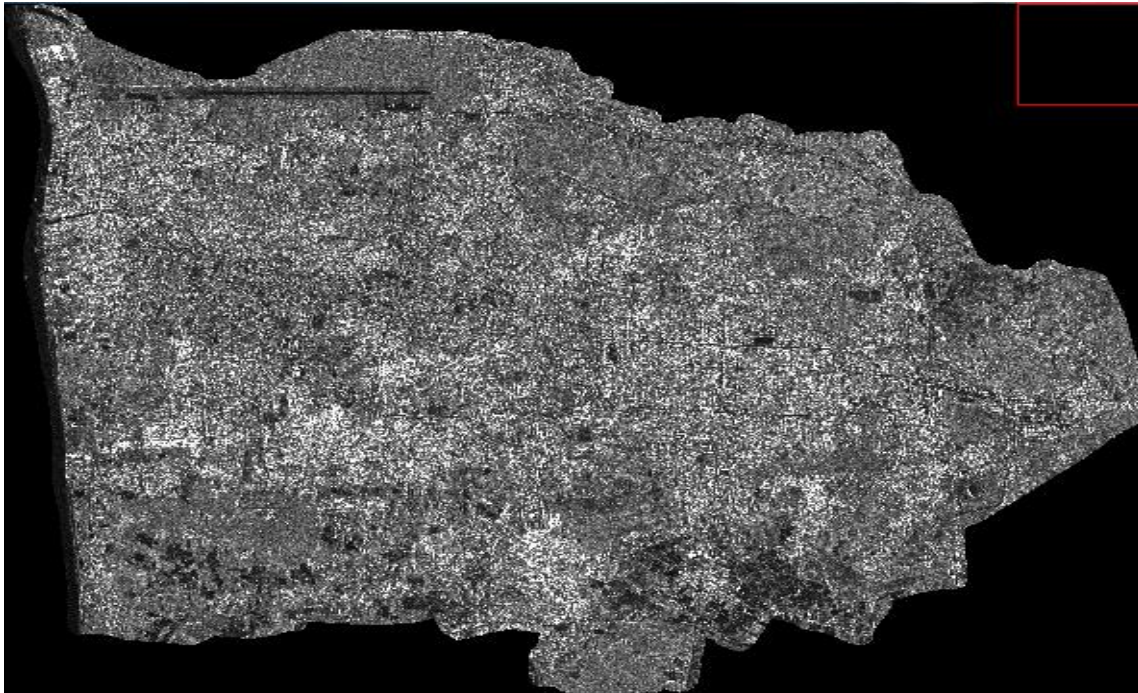


Abbildung 3: Untersuchungsgebiet Mataram

Prozessierungsworkflow

Die zur Siedlungsextraktion herangezogenen TerraSAR-X-Szenenausschnitte des erweiterten Stadtgebietes von Mataram wurden mit dem in Abbildung 4 dargestellten Workflow prozessiert

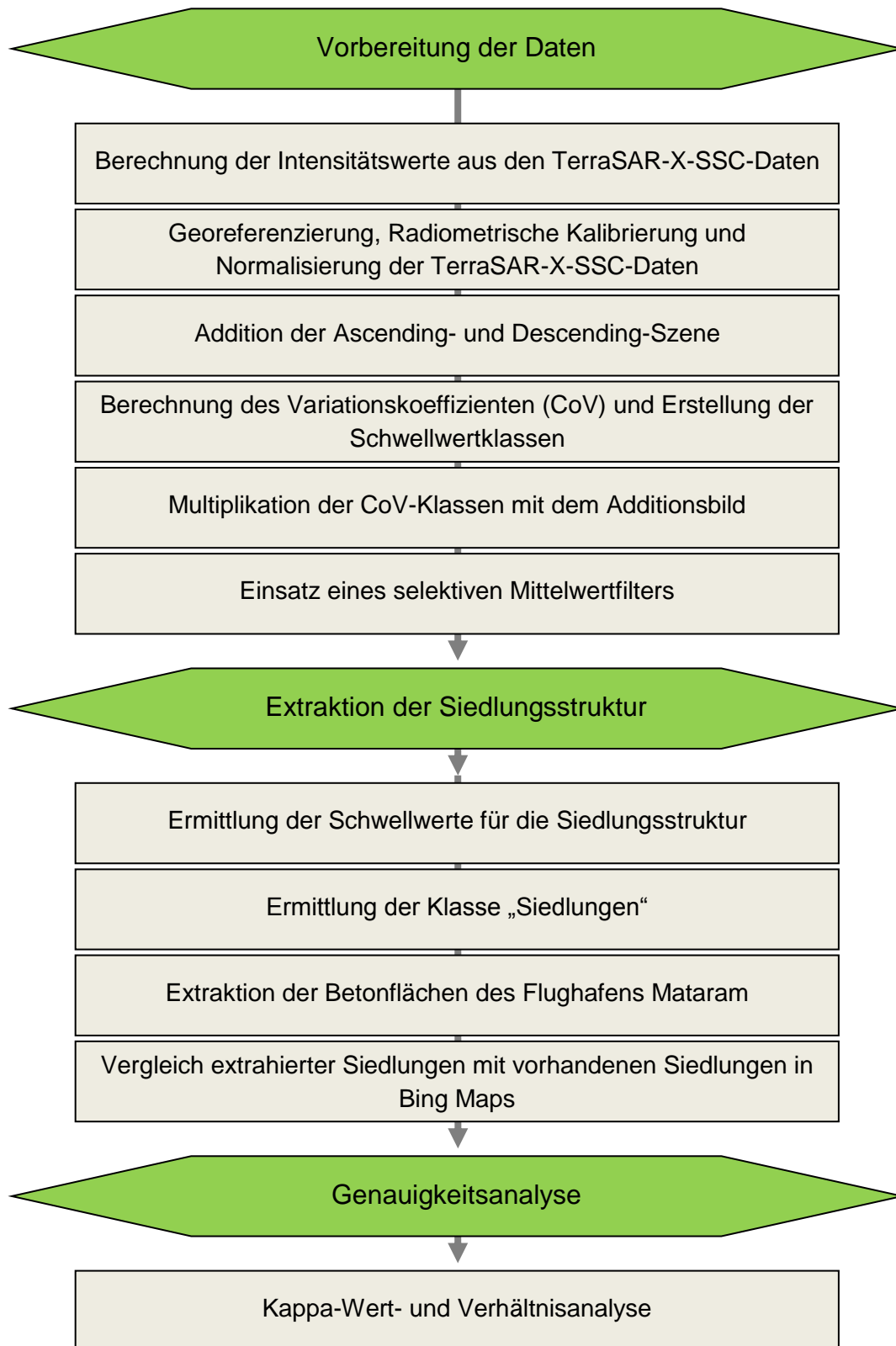


Abbildung 4: Prozessierungsworkflow

Nachdem beide Szene georeferenziert, radiometrisch kalibriert sowie normalisiert wurden und deckungsgleich waren, erfolgte die Addition dieser Intensitätsbilder (Ascending, Descending) (Abbildung 5). Das Ziel war, die Intensitäten beider Szenen in einem Bild zusammen zu fassen.

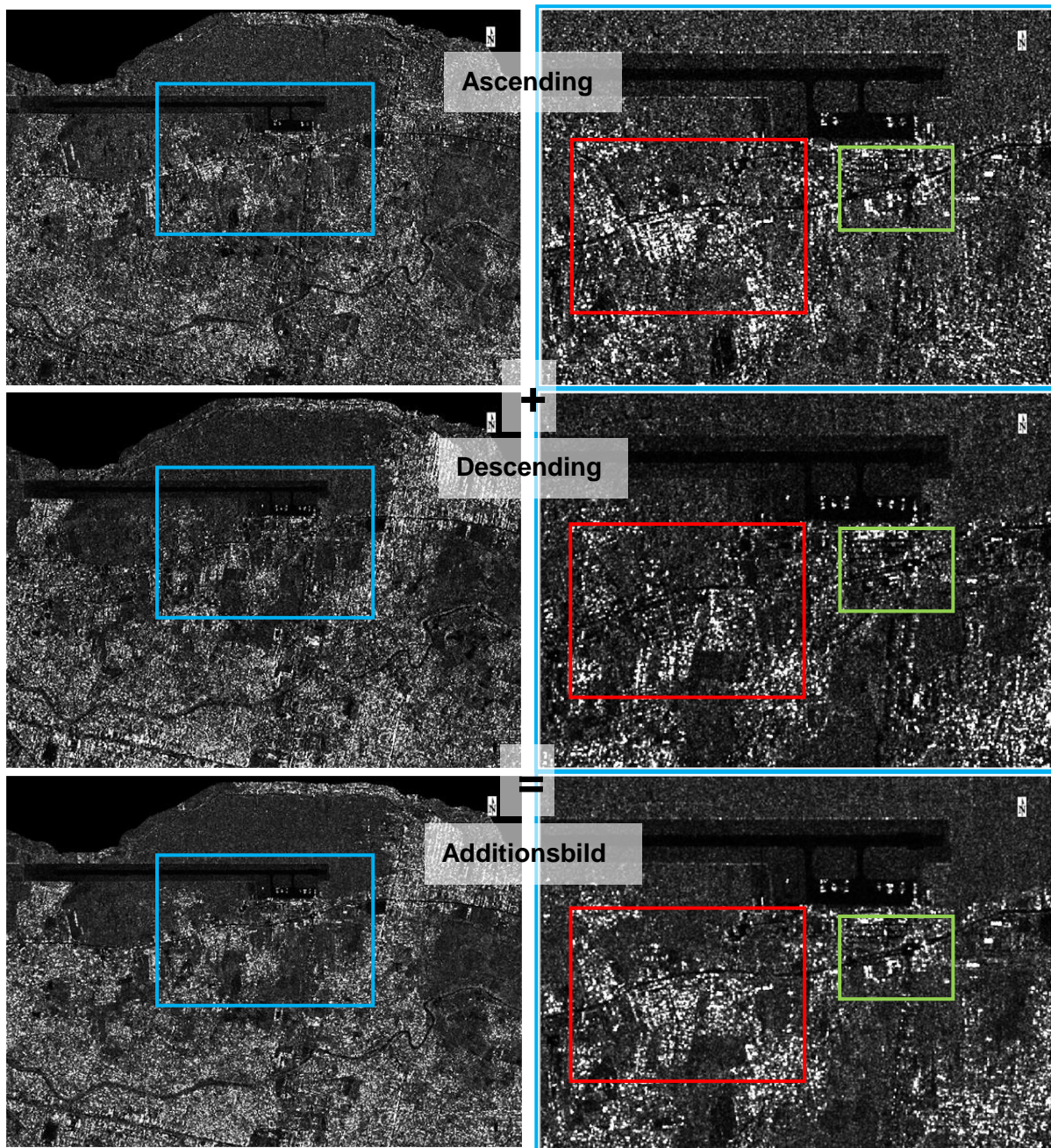


Abbildung 5: Erstellung des Additionsbildes (unten) aus den beiden Intensitätsbildern aus der Ascending Flugbahn (oben) und der Descending Flugbahn (Mitte) mit Darstellung eines größeren Ausschnittes des Stadtgebietes Mataram (links) und einem verkleinerten in der Umgebung des Flughafens (rechts). Der blau markierte Bereich (linke Bildreihe) zeigt die Lage des in der rechten Bildreihe dargestellten Ausschnittes. Die markierten Bereiche (rechte Bildreihe – rot/grün) zeigen die Siedlungsflächen, welche in Abbildung 6 separat betrachtet werden.

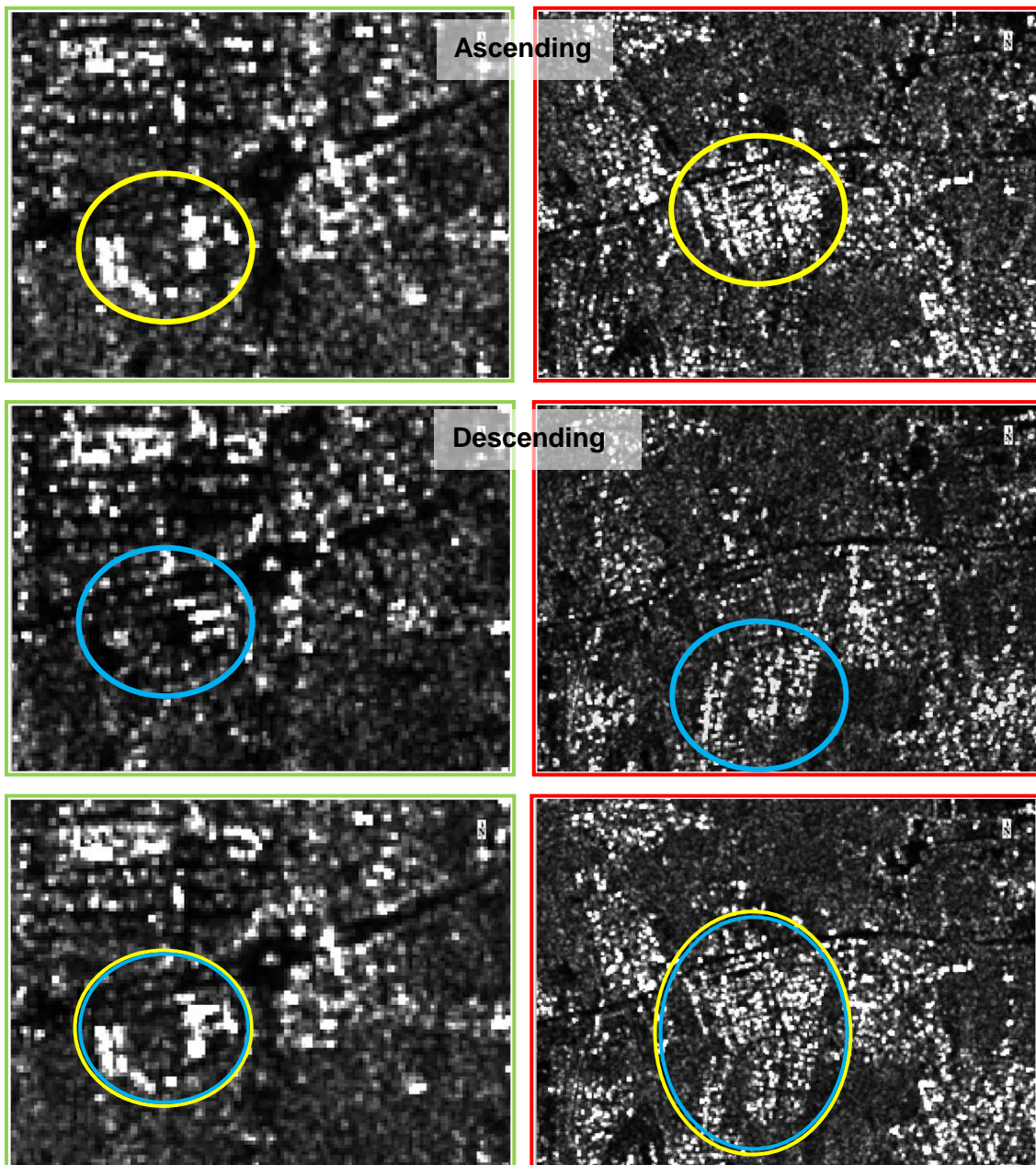


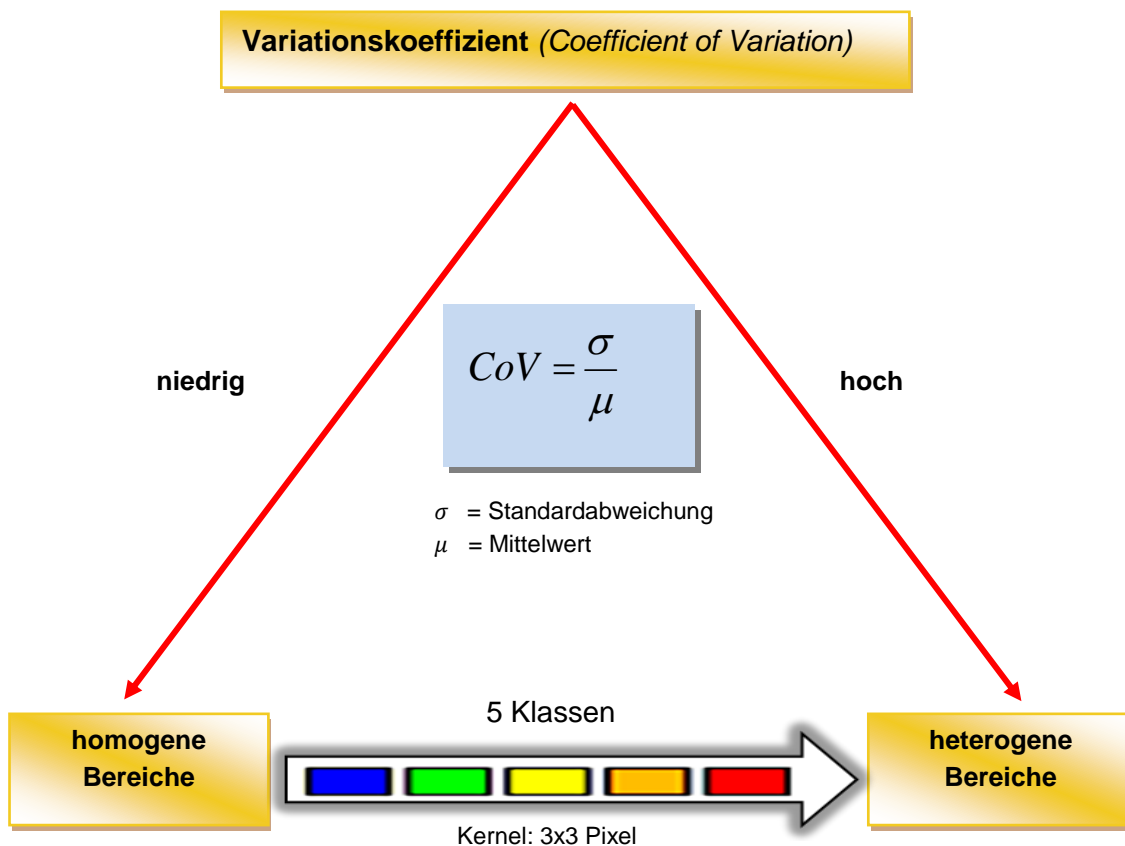
Abbildung 6: Darstellung von zwei unterschiedlichen Siedlungsbereichen (wie in Abbildung 5 in der rechten Bildreihe rot und grün markiert). Die linke Reihe (grün) zeigt einen Ausschnitt unterhalb des Flughafens von Mataram und die rechte Reihe einen Bereich mit starker Siedlungsstruktur. Die addierten Intensitätswerte im Additionsbild zeigen eine starke Rückstreuung dort, wo diese in der Ascending-Szene (oben) sowie in der Descending-Szene (Mitte) ebenfalls vorhanden ist. Alle anderen Bereiche bleiben unverändert im Bereich geringer Rückstreuung.

Bereiche, welche in beiden Szenen fast unverändert sind (homogene Gebiete), erscheinen auch im Additionsbild entsprechend. Starke Rückstreuer der jeweiligen Szene dominieren dagegen das Additionsbild. Durch diese Methode sind alle starken Rückstreuer aus dem Ascending- und Descending-Modus in einem Bild zusammengefasst. Das setzt vor allem zwei deckungsgleiche Szenen und ein topographisch relativ unbeeinflusstes Areal voraus. In topographisch stark beeinflusstem Gelände müssen gerade Layoverbereiche sowie auch steile, dem Sensor zugewandte Hänge aufgrund starker und Siedlungen gleichender Rückstrahlung besonders ausgewiesen werden.

Das nach der Addition der beiden Intensitätsbilder des Ascending- und Descending-Modus vorliegende Additionsbild dient nun als Grundlage zur Berechnung des Variationskoeffizienten (CoV). Durch Ermittlung des CoV wird ein Bild dahingehend aussagekräftig, welche Bereiche als eher homogen oder heterogen zu bezeichnen sind. Hinsichtlich des Ziels der Studie, die Siedlungsstruktur zu extrahieren, sind besonders die heterogenen Bereiche interessant.

Der Variationskoeffizient (CoV) gibt das Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert wieder. Er bewegt sich zwischen 0 und 1, wobei „0“ absolut homogen ist und „1“ die höchste Variation aufweist (Formel 1).

Ziel der Bildung des CoV war die Erstellung von 5 Schwellwertklassen zur Einteilung des CoV-Bildes in Bereiche zwischen homogen und heterogen (Abbildung 7) und die Hervorhebung vor allem heterogener Gebiete.



Formel 1: Berechnung des Variationskoeffizienten über einen Kernel von 3x3 Pixeln und manuelle Einteilung in fünf Schwellwertklassen zwischen homogen und heterogen.

Das Ziel der Erstellung eines Schwellwertbildes aus den nun gemittelten Werten des CoV war die gewichtete Hervorhebung der Variationen der Intensitäten. Die höchste Gewichtung (Klasse 5 = Gewichtung 5) erhalten die Gebiete sehr hoher Variationswerte. In Abbildung 7 (Bild rechts unten) ist ein Ausschnitt aus dem Schwellwertbild des gemittelten CoV zu sehen. Die blauen Bereiche stellen die Gebiete mit einem geringen CoV dar, weshalb diese als homogen angesehen und der Klasse 1 zugeordnet wurden. Der rote Bereich zeigt die Gebiete mit einem sehr hohen CoV, welcher auf heterogene Flächen hinweist. Demzufolge wurden diese Flächen der Klasse 5 zugewiesen.

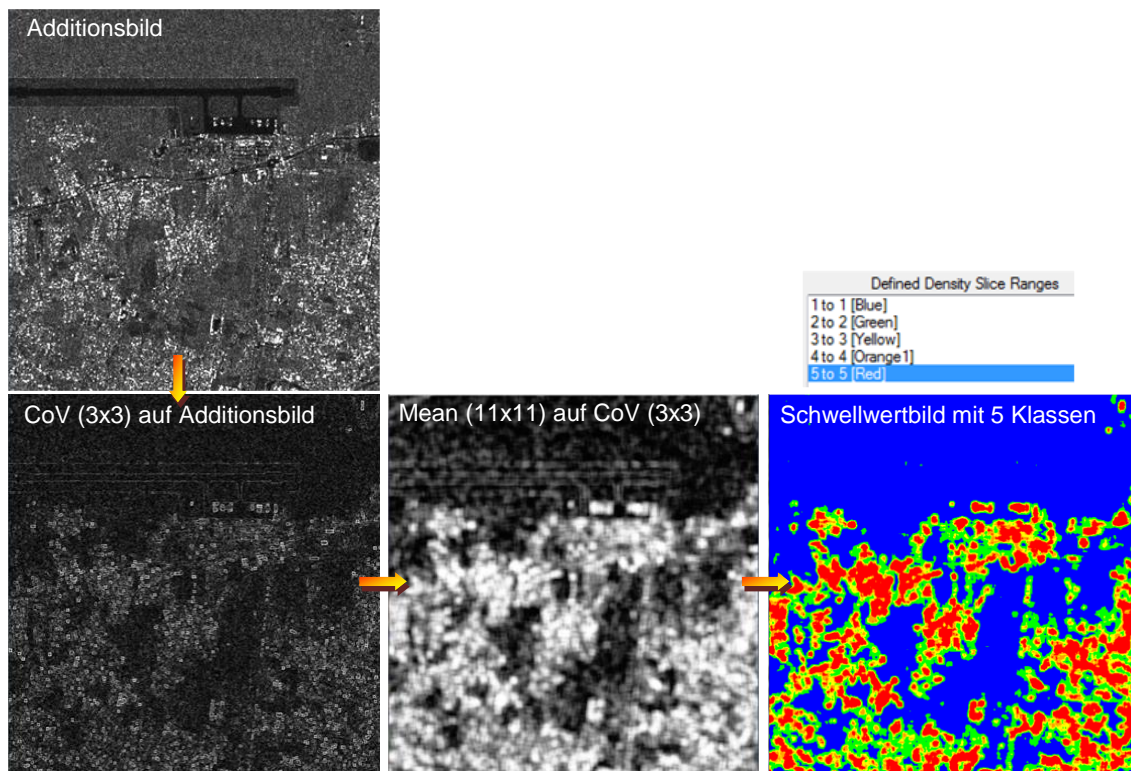


Abbildung 7: Ausgehend vom Additionsbild der Intensitäten (links oben) wird der CoV mit einem Kernel von 3x3 Pixeln erstellt (links unten). Über die Mittelwertfilterung über 11x11 Pixel (mean) des CoV-Ergebnisses wird die Abgrenzung der homogenen von den heterogenen Gebieten sehr gut herausgearbeitet (unten Mitte). Das auf Basis des Mittelwertfilters erstellte Schwellwertbild stellt die Gewichtung der Bereiche von homogen zu heterogen in fünf Klassen dar.

Das aus dem gemittelten CoV entstandene Schwellwertbild beinhaltet nun Gewichtungswerte von 1 bis 5. Diese Gewichtung bildete die Grundlage zur Multiplikation mit dem Additionsbild. Dadurch war es möglich, das TerraSAR-X-Additionsbild, abgestuft in fünf Klassen, von homogenen bis heterogenen Gebieten, gewichtet zu multiplizieren. Im Ergebnis entstand ein Multiplikationsbild, in welchem aufgrund der Gewichtung „5“ bei stark heterogenen Gebieten, deren Intensitätswerte um das Fünffache vergrößert wurden, dagegen aber bei homogenen Gebieten mit dem Gewichtungsfaktor „1“ diese unverändert blieben. Dieser Prozess diente dazu eine deutlichere Abgrenzung der einzelnen Klassen (homogen bis heterogen) zu erreichen (Abbildung 8). Im Multiplikationsbild sind die Objekte mit starker Rückstrahlung nunmehr hervorragend herausgearbeitet.

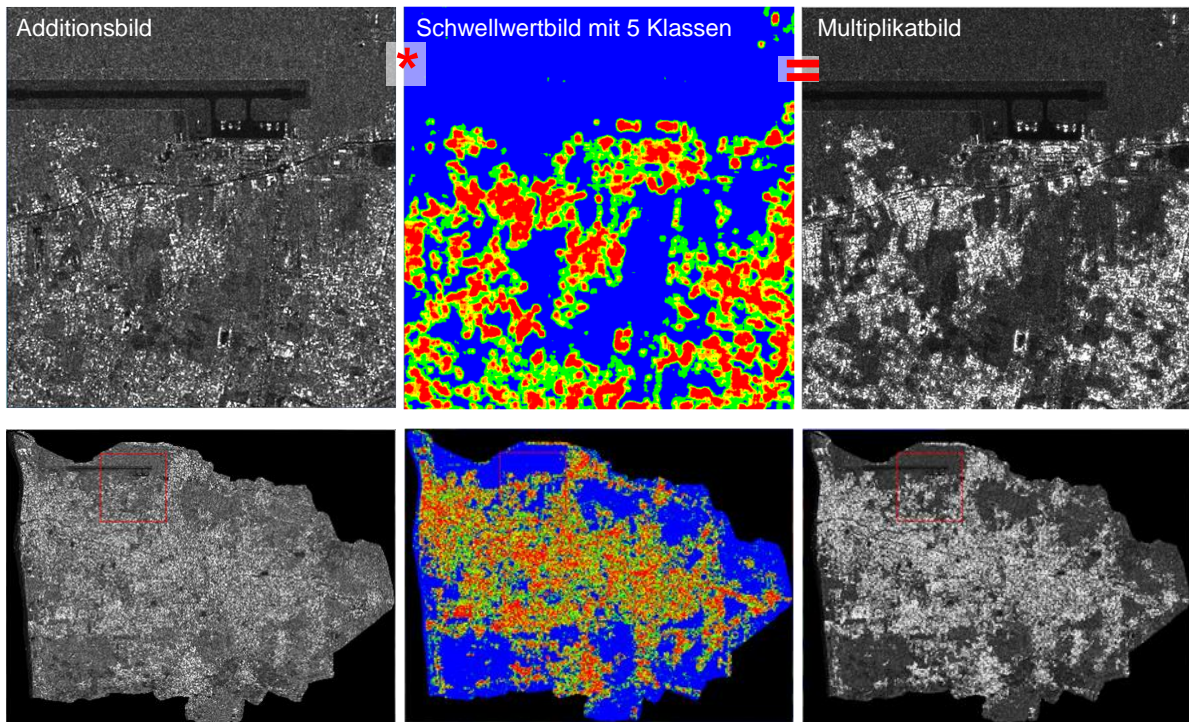


Abbildung 8: Prozess der Multiplikation des Additionsbilds (links) mit dem Schwellwertbild, welches auf dem Variationskoeffizient basiert (Mitte) und dem als Ergebnis resultierenden Multiplikationsergebnis (rechts). In der oberen Bildreihe ist ein Ausschnitt der Szene (rote Markierung) aus der unteren Bildreihe dargestellt.

Im nächsten Schritt wurde auf das Multiplikationsergebnis ein selektiver Mittelwertfilter über einen Kernel von 3x3 Pixeln angewendet. Dieser soll das Bild in vorgegebenen Bereichen unterschiedlich stark filtern. Um das zu erreichen, wurde das CoV-Schwellwertbild (5 Klassen) zur Auswahl der Filtergebiete herangezogen. Das diente dem Zweck, dass in homogenen Bereichen die Filterung über den gesamten Kernel erfolgte (Gewichtung „1“), wogegen in heterogenen Bereichen, mit einer Gewichtung „5“, nur die Intensitätswerte in die Filterung einbezogen wurden, welche sich nicht mehr als 20% vom Mittelpixel im Kernel unterscheiden (Abbildung 9). Somit wurde erreicht, dass gerade in heterogenen Gebieten nur die für die Siedlungsstruktur relevanten Pixel einer Filterung unterlagen und damit erhalten blieben. An sich homogene Gebiete unterlagen dabei einer starken Glättung, was im Hinblick auf Einzelbäume oder Baumreihen durchaus wünschenswert war, da deren Rückstreuung ähnlich der von Siedlungen ist.

In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass diese Filterung in homogenen Bereichen zu einer deutlichen Glättung führt. Die heterogenen Abschnitte dagegen werden stärker hervorgehoben, da die Mittelwertfilterung nur Werte innerhalb einer definierten Abweichung zum Mittelpixel verwendet.

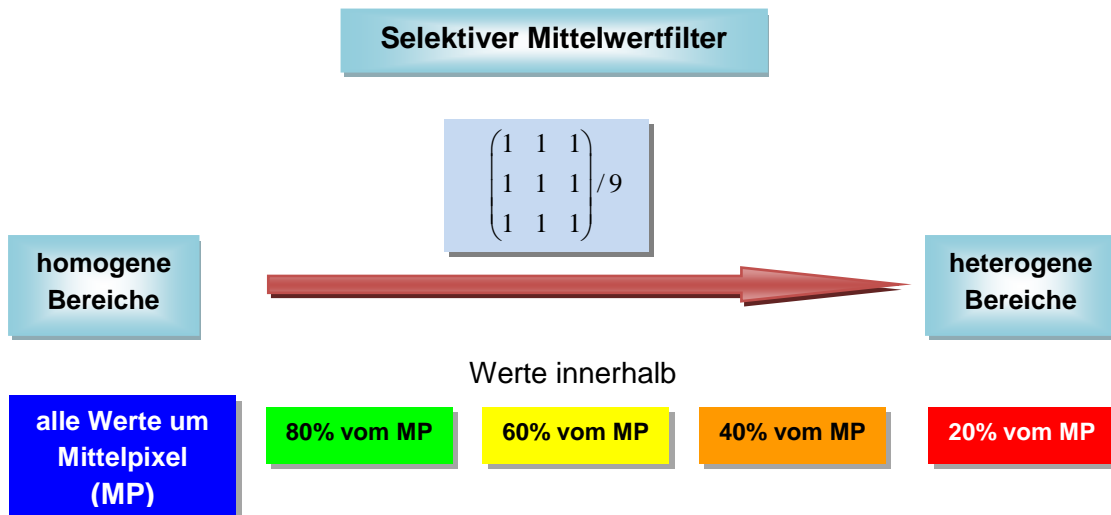


Abbildung 9: Die Anwendung des selektiven Mittelwertfilters basiert auf dem CoV-Schwellwertbild (5 Klassen) und dem Multiplikativbild (8 bit). In homogenen Gebieten werden alle Grauwerte des Kernel in die Filterung einbezogen. Zur Mittelwertbildung in stark heterogenen Gebieten werden nur Werte einbezogen, welche sich nicht mehr als 20% vom Mittelpixel (MP) unterscheiden.

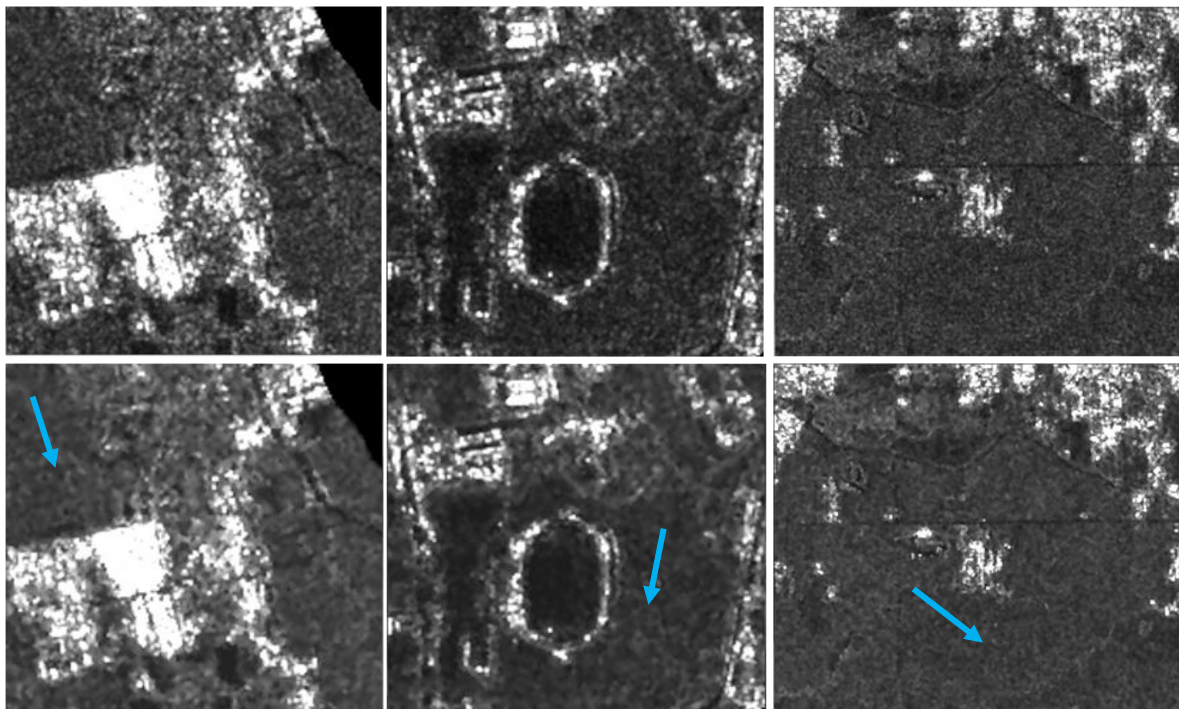


Abbildung 10: Die Filterwirkung des für diese Studie eingesetzten selektiven Mittelwertfilters am Beispiel einiger Ausschnitte aus dem Multiplikativbild in 8 bit (oben) zeigt sich im gefilterten Multiplikativbild (unten) durch eine deutliche Glättung homogener Bereiche. Die blauen Pfeile weisen auf homogene Gebiete hin.

Mit dem selektiven Mittelwertfilter wurde die Trennbarkeit homogener und heterogener Bereiche, damit also der Siedlungsstrukturen noch gesteigert, wodurch sich die Voraussetzungen für die Siedlungsextraktion verbesserten. Das gefilterte Multiplikativbild diente anschließend als Grundlage für die Ermittlung von Schwellwerten die die Siedlungsstruktur charakterisieren.

Auf Basis des gefilterten Multiplikatbildes wurde nun über einen manuellen Schwellwertbereich die Siedlungsstruktur erfasst. (Abbildung 11)

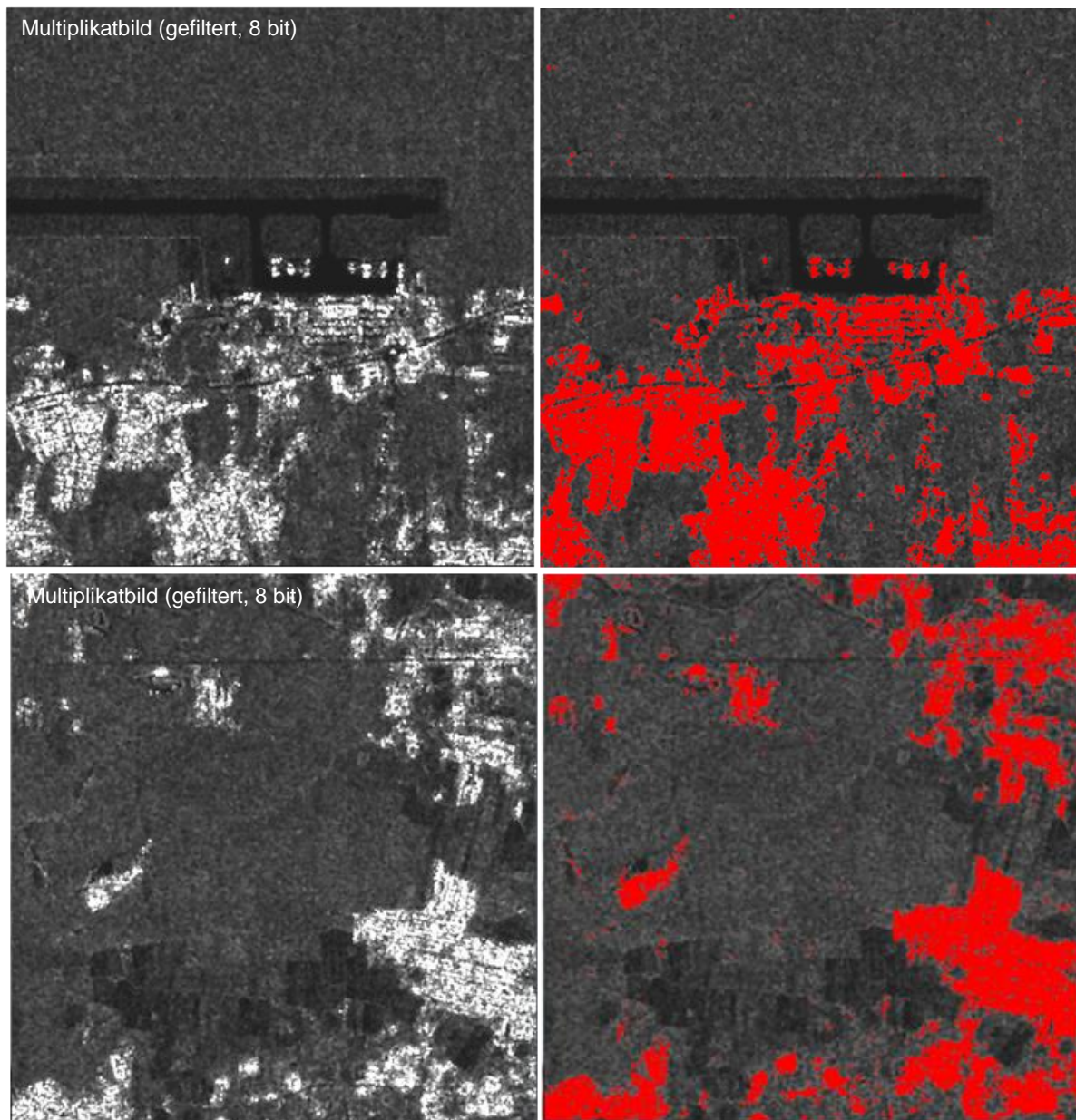


Abbildung 11: Gegenüberstellung von zwei Ausschnitten des gefilterten Multiplikatbildes (links) und dem entsprechend der Siedlungsstruktur gewählten Schwellwertbereiches.

Die Darstellung in Abbildung 12 zeigt das Resultat der Extraktion der Siedlungsstruktur innerhalb der Grenze von Mataram (weiß)

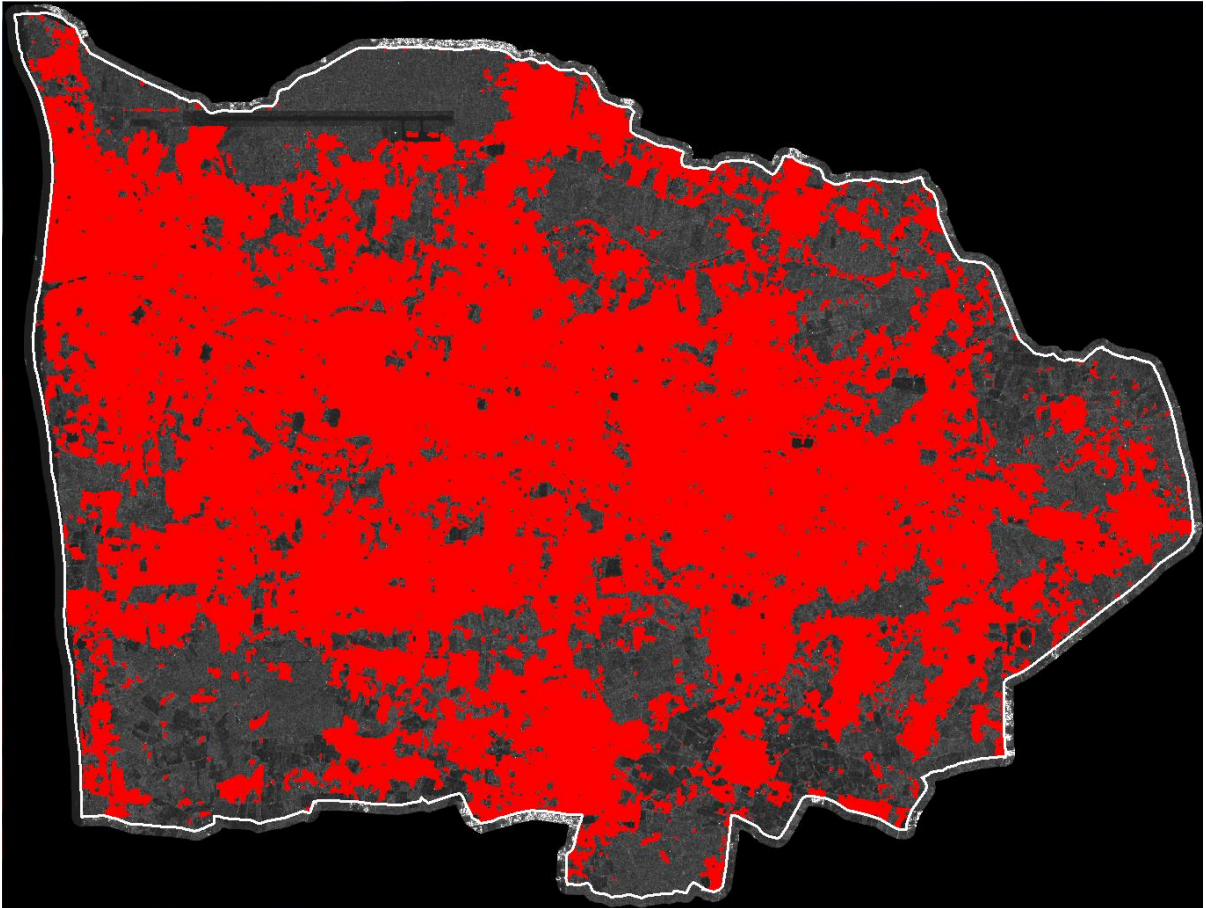


Abbildung 12: Die Abbildung stellt die aus den TerraSAR-X-Ausschnitten extrahierte Siedlungsstruktur innerhalb der Grenzen des Stadtgebietes Mataram (weiße Linie) dar.

Die extrahierte Siedlungsstruktur wurde einer Genauigkeitsanalyse unterzogen.

Die Genauigkeitsanalyse der Extraktionsergebnisse basiert auf dem Vergleich zwischen den TerraSAR-X-Datensätzen (August und September 2011) und den Grundkarten aus Bing Maps (vorwiegend aus Oktober 2010 und im östlichen Randgebiet von Mataram aus August 2011).

Die Trefferquote aus der Analyse war in diesem Fall nur vor dem Hintergrund älterer Vergleichskarten aus Bing Maps zu interpretieren. Ein Groundcheck ist erforderlich, konnte aber bisher noch nicht durchgeführt werden.

Um eine unter diesen Umständen möglichst genaue Aussage über die Qualität des Ergebnisses treffen zu können, wurden 2 Verfahren zur Überprüfung des Resultates herangezogen.

- Kappa-Wert Analyse
- Verhältnisanalyse

a) Kappa-Wert Analyse

Der Kappa-Wert trifft eine Aussage über die Qualität der Übereinstimmung zwischen den extrahierten und den realen Daten. Als Grundlage der Berechnung wird durch eine Zufallsauswahl (*random points*) eine ausreichende Anzahl an Analysepunkten über das zu prüfende Gebiet verteilt. Danach wird ermittelt ob an diesem Punkt die klassifizierte mit der realen Fläche übereinstimmt bzw. welcher Klasse es zuzuordnen ist (Siedlung oder Nicht-Siedlung). Dazu wird das Gebiet mindestens in zwei Klassen unterteilt und eine Aussage darüber getroffen, welcher Klasse die extrahierte zugeordnet werden kann. Stimmen alle extrahierten Daten mit den realen Daten überein, dann ist $Kappa = 1$ (Formel 2).

Für das Untersuchungsgebiet Mataram wurden 500 Zufallspunkte in ArcMap 10.0 produziert. Die Einteilung der beiden Klassen erfolgte nach Siedlung und Nicht-Siedlung. Die Analyse bestand darin, die am Zufallspunkt extrahierte Klasse mit den realen Gegebenheiten (Bing Maps) zu vergleichen und entsprechend zu kennzeichnen. Die zufallsgenerierten Punkte setzten sich aus 296 Siedlungsgebieten und 204 Nicht-Siedlungen zusammen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Ergebnis der Kappa-Wert-Analyse

	Siedlungen (Bing Maps)	Nicht-Siedlungen (Bing Maps)	Gesamt
erfasste Siedlungen	291	9	300
erfasste Nicht-Siedlungen	5	195	200
Gesamt	296	204	500

Von insgesamt 296 Zufallspunkten, welche lt. Grundkarte Siedlungen ausweisen, konnten 291 durch die Extraktion erkannt werden. An 5 Punkten wurde eine Fehlklassifikation festgestellt. Die in diesem Bereich als Siedlung extrahierten Gebiete konnten im Vergleich zu Bing Maps ausschließlich als Vegetationsflächen erkannt werden. Von den 204 Nicht-Siedlungen wurden 9 fälschlicherweise als Siedlungen deklariert.

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

P_o = Anzahl der Übereinstimmung der extrahierten Werte
 P_e = Anzahl der erwarteten Übereinstimmung (100%)
 κ = Kappa-Koeffizient

$$P_o = \frac{291+195}{500} = 0,97$$

$$P_e = (P_{e_Siedlung1} * P_{e_Siedlung2}) + (P_{e_Nicht - Siedlung1} * P_{e_Nicht - Siedlung2})$$

$$P_e = \left(\frac{291+9}{500} * \frac{291+5}{500} \right) + \left(\frac{5+195}{500} * \frac{9+195}{500} \right) = 0,518$$

$$\kappa = \frac{0,97 - 0,518}{1 - 0,518} = 0,94$$

Formel 2: Ermittlung des Kappa-Koeffizient (Quelle: COHEN, JACOB, 1960) und Darstellung der Berechnung an Hand des Ergebnisses aus Tabelle 1

Die Qualität des Kappa-Koeffizienten wird nach Tabelle 2 beurteilt.

Tabelle 2: Kappa-Koeffizient und seine Einteilung in die Stärke der Übereinstimmung (Quelle: ALTMAN, DOUGLAS G., 1991)

Kappa-Koeffizient κ	Stärke der Übereinstimmung
<0,20	schwach
0,21 – 0,40	leicht
0,41 – 0,60	mittelmäßig
0,61 – 0,80	gut
0,81 – 1,00	sehr gut

Als Resultat wurde ein Kappa-Koeffizient von 0,94 erzielt, was für eine sehr gute Übereinstimmung der extrahierten mit den vorhandenen Siedlungsdaten spricht.

b) Verhältnisanalyse

Die Verhältnisanalyse stellt das Verhältnis zwischen den extrahierten und den realen Siedlungsgebieten dar. Es existiert nur eine Klasse „Siedlungen“.

Für das Untersuchungsgebiet Mataram wurden wiederum 500 Zufallspunkte in ArcMap 10.0 produziert und zwar so, dass nur Siedlungsgebiete für die Analyse in die Auswahl kamen. Die Analyse bestand darin, die am Zufallspunkt extrahierte mit der realen Klasse (Bing Maps) der Siedlungen zu vergleichen.

An den 500 Zufallspunkten wurden 480 als Siedlungen erkannt, während an 20 weiteren Punkten eine Fehlklassifikation auftrat. Die erzielte Qualität der Siedlungsextraktion beläuft sich auf 95,8%.

Das Ergebnis der Extraktion der Siedlungsbereiche beruht auf einer räumlichen Auflösung des TerraSAR-X-Bildes von 6 m und einem Pixelabstand von 3 m. Das bedeutet also, dass jeder Bildpunkt eine Fläche von 9 m² besitzt (Abbildung 13).

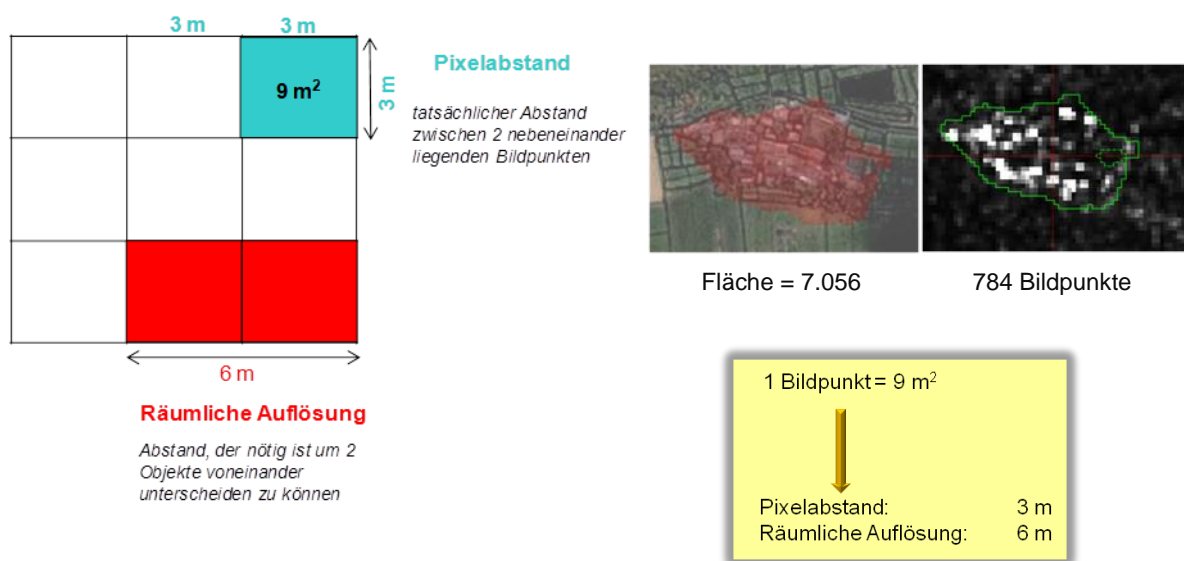


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen räumlicher Auflösung und Pixelabstand

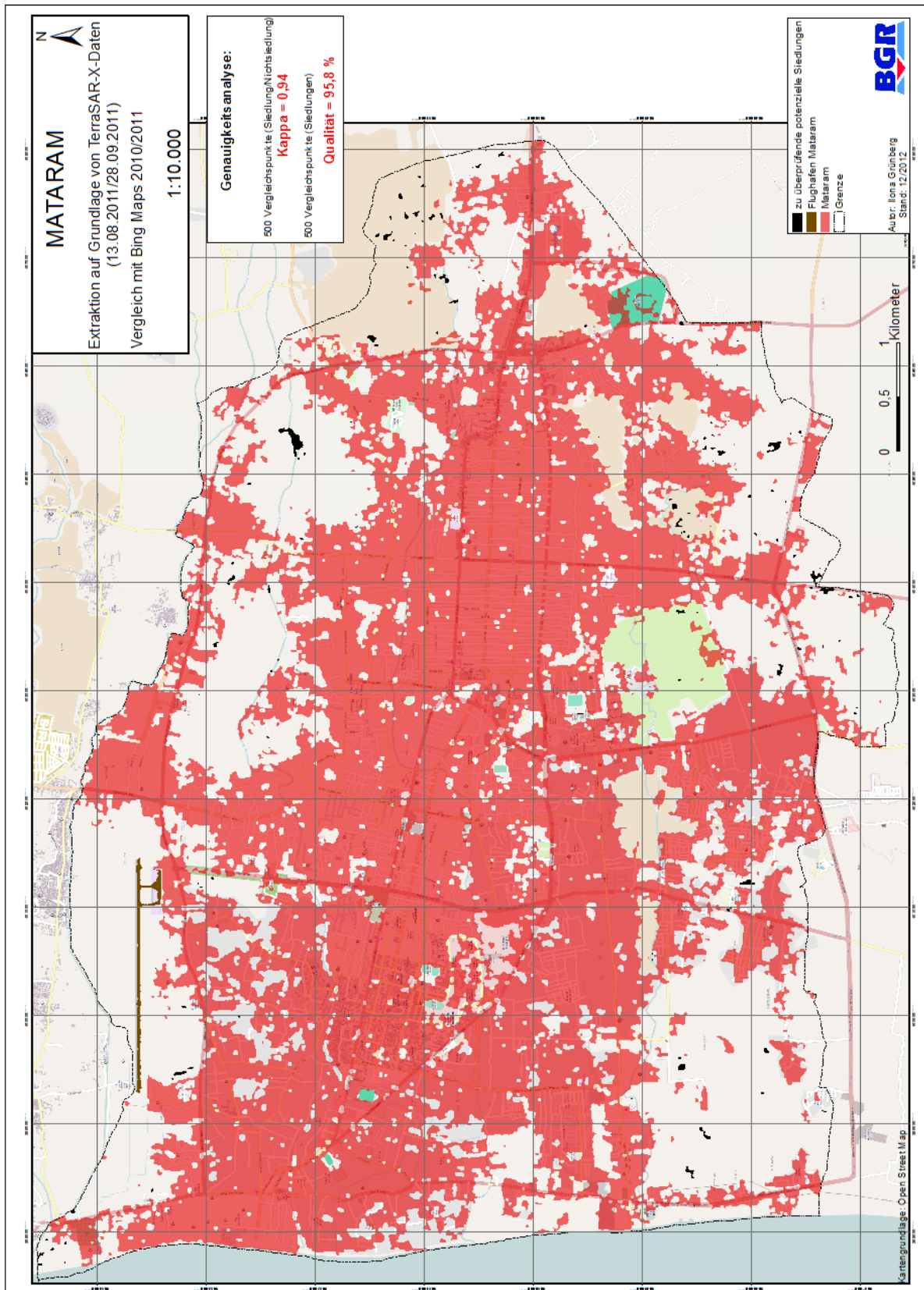


Abbildung 14: Karte der Siedlungsextraktion Mataram (wurde bereits an die indonesischen Projektpartner übergeben)

Zusammenfassung und Ausblick

Mit einem Kappa-Wert von 0,94 und einer Übereinstimmung von 95,8% entsprechend der Verhältnisanalyse, konnte die Siedlungsextraktion für das Stadtgebiet von Mataram mit einem sehr guten Ergebnis abgeschlossen werden. Der Test zeigt weiter, dass hochauflösende Radar-Daten in tropischen Gebieten, in denen auf Grund von häufiger Bewölkung, optische Daten nur begrenzt für Siedlungsklassifikationen nutzbar sind, eine sinnvolle Alternative darstellen können. Ein Zugriff auf diese Option ist insbesondere für die Unterstützung von Risikoanalysen in tropischen Regionen von Bedeutung.

Mit den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen wurden darüber hinaus im Arbeitsbereich Fernerkundung der BGR die technischen-methodischen Voraussetzungen geschaffen, Siedlungsklassifikationen für Risikoanalysen kurzfristig mit neuesten Radar-Daten (z.B. TerraSAR-X) und unter Nutzung neuester Software-Pakete (z.B. ENVI 5.0 – SARscape) durchführen zu können.

Die Untersuchungen haben weiter gezeigt, dass die Methode der Extraktion von Siedlungen aus TerraSAR-X-Daten gerade in größeren zusammenhängenden Stadtgebieten – wie im Falle von Mataram gegeben - sehr gut anzuwenden ist. Demgegenüber treten bei kleineren Siedlungsgebieten vor allem durch deren Struktur (von Vegetation, Bäumen, Flüssen, von Feldern umgebene Häuser/Farmen) Mehrdeutigkeiten in der Interpretation auf, so dass diese Gebiete in den TerraSAR-X-Szenen nur sporadisch, entsprechend der radarspezifischen Besonderheiten erfasst wurden. Die Trennbarkeit der Objekte ist in manchen Fällen teilweise nicht gegeben.

Abhilfe könnten hier eine multitemporale Betrachtung zu erfassender Gebiete, die Wahl von Szenen unterschiedlicher Polarisationen oder auch die Kombination von Radar- mit hochauflösenden optischen Aufnahmen bringen. Multitemporale Analysen haben hinsichtlich der Extraktion von Siedlungen den Vorteil, dass sich das Streuverhalten von Siedlungskomponenten über die Zeit kaum ändert. Vegetation dagegen ist durch eine starke Veränderung gekennzeichnet, sei es die Wachstumsperioden oder auch durch Veränderungen in der Natur, durch Rodungen usw. Durch die vergleichsweise kurze Wellenlänge im X-Band findet die Streuung vornehmlich an den Zweigen und Blättern statt, wobei selbst die Bewegung von Blättern durch Wind einen starken Einfluss auf die Rückstreuung besitzt. Das bedeutet, dass zwischen zeitlich versetzten Aufnahmen im Bereich der Vegetation grundsätzlich eine schlechte Kohärenz vorhanden ist.

Auch die Polarisation hat starken Einfluss auf die Trennbarkeit und Darstellung von Objekten. Gebäude beispielsweise haben eine planbare Rückstreuung, Vegetation dagegen unterliegt der zufälligen nicht planbaren Rückstreuung. Vegetation könnte daher von Siedlungen durch die Anwendung unterschiedlicher Polarisationen eine bessere Trennbarkeit erfahren. In diesem Feld wären weitere Untersuchungen noch durchzuführen.

Eine Optimierung des insgesamt sehr guten Ergebnisses könnte erreicht werden, wenn durch Geländeüberprüfungen Ursachen für Fehlklassifikationen erkannt und zur Fehlerminimierung genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, auf Grundlage hochauflösender zeitnah aufgenommener Satellitenbilder - soweit inzwischen verfügbar - gezielt die Fehler in der Klassifikationszuordnung zu ermitteln und das Ergebnis entsprechend zu überarbeiten.