

# Master Thesis

im Rahmen des  
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“  
(UNIGIS MSc) am Zentrum für Geoinformatik (Z\_GIS)  
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

## „GIS-gestützte Standortermittlung anhand ausgewählter Umweltfaktoren“

Prüfung eines Ansatzes kombinierter Methoden Geographischer  
Informationssysteme und multikriterieller Entscheidungsunterstützung im Hinblick  
auf die Anwendbarkeit für die Stadtplanung (am Beispiel Wohnbebauung)

vorgelegt von

**Dipl.-Geogr. Manuel Gatzweiler**  
U1295, UNIGIS MSc Jahrgang 2006

Zur Erlangung des Grades  
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:  
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Mülheim an der Ruhr, 31.10.2008

## **Erklärung der eigenständigen Abfassung**

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Manuel Gatzweiler

Mülheim an der Ruhr, 31.10.2008

## **Vorwort**

Einen großen Dank möchte ich an zahlreiche Vertreter unterschiedlicher Ämter, Behörden und Fachgebiete der Stadtverwaltung Duisburg richten, die mich nicht nur durch die Bereitstellung zahlreicher Daten, sondern auch durch viele hilfreiche Gespräche und Hinweise bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit unterstützt haben.

Ein weiterer Dank gebührt dem LANUV NRW für die Bereitstellung verschiedener Datengrundlagen.

Ganz besonderen Dank möchte ich aber vor allem meiner Familie widmen, die während der gesamten Studienzeit und insbesondere in den letzten Monaten mit außerordentlicher Geduld in ganz erheblichem Maße auf mich verzichtet hat.

Hoffentlich erkennt man mich noch wieder.

## **Kurzfassung**

Aufgabe der Stadtplanung ist es, unter Berücksichtigung zahlreicher Belange die Entwicklung der Bodennutzung innerhalb des Gemeindegebiets zu steuern. Vor allem bei großräumigen Planungen ist die Komplexität einer abschließenden sachgerecht abgewogenen Entscheidungsfindung in einem vielschichtigen Geflecht unterschiedlichster alternativenspezifischer Einzelbewertungen vielfach immens.

Ziel dieser Arbeit war es, einen möglichen Ansatz zu finden, um im Hinblick auf einen Teil der Gesamtproblematik mit technischen Mitteln eine mehrere Themen umfassende aggregierte Entscheidungsgrundlage zu erzeugen. Eine Kombination von Methoden der geographischen Informationsverarbeitung und der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung wurde dabei zur Anwendung gebracht, um die aus Umweltsicht geeigneten Standorte für die Ausweisung bzw. Verdichtung von Wohnnutzung zu ermitteln.

Hierzu wurden zunächst auf Basis von Literaturrecherchen und Expertengesprächen Umweltfaktoren ermittelt, die für die als Untersuchungsgebiet gewählte Stadt Duisburg als besonders bedeutend angesehen werden. Unter Verwendung der Fuzzy-Set-Theorie entliehener Methoden wurden die den einzelnen Umweltthemen zielgerichtet zugrunde gelegten Daten entsprechend der jeweils relevanten fachlichen Vorgaben in standardisierte Karten überführt, anhand derer die aus Sicht des einzelnen Belangs spezifische Flächeneignung für die anvisierte Wohnnutzung abgelesen werden kann.

Methoden des Analytic Hierarchy Process (AHP) und des Ordered Weighted Average Approach (OWA) dienten im Anschluss dazu, die derart generierten Eignungskarten unter Berücksichtigung einer die Entscheidungssituation repräsentierenden hierarchischen Struktur sukzessive zu einer umfassenden Beurteilungsgrundlage zusammenzuführen. Dabei wurden unter Variation bedeutender Modellvariablen verschiedene Szenarien erzeugt, um die Robustheit der Ergebnisse zu überprüfen. Es zeigte sich, dass für große Teile des Untersuchungsgebiets in Abhängigkeit von den getroffenen Annahmen erheblich differierende Empfehlungen für die Planung resultieren. Allerdings konnten auch verschiedene Bereiche ermittelt werden, für die aus Sicht der betrachteten Umweltbelange mit vergleichsweise großer Sicherheit von einer hohen Standorteignung für Wohnbebauung ausgegangen werden kann.

Auch wenn sowohl in inhaltlicher als auch in methodischer Hinsicht zum Teil erheblicher Weiterführungsbedarf besteht, kann der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz grundsätzlich als flexibles Modellierungswerkzeug für Entscheidungssituationen der betrachteten Art und unter bestimmten Voraussetzungen sinnvoll einsetzbares Instrument zur Erstellung von rational nachvollziehbaren Planungsgrundlagen angesehen werden.

## **Abstract**

A major objective of urban planning is to control the development of land use within a municipal area taking into consideration a large number of specific concerns. Particularly with regard to urban planning incorporating greater areas, the complexity of a concluding balanced decision making process is immense due to diverse specific evaluations within a multilayer network.

The aim of this study was an approach to generate by technical means a rational comprehensible evaluation basis including various relevant aspects regarding a specific part of this complex of problems. A combination of methods used for the Geographical Information Science and for Multicriteria Decision Making was applied to identify optimal locations for the development of residential areas from an environmental point of view.

Based on literature research und expert interviews, relevant environmental factors were identified with specific reference to the area chosen for this investigation (Duisburg). Methods of the Fuzzy-Set-Theory were applied to calculate a standardized criterion map for each of the identified environmental aspects with regard to relevant legal specifications. These maps served subsequently as the basis to evaluate the land suitability of the alternatives within the given area for residential areas considering the particular environmental concern.

Subsequently, methods of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Ordered Weighted Average Approach (OWA) were applied to aggregate these suitability maps to a comprehensive evaluation basis following a defined hierarchical structure of the decision situation. To validate the sensitivity of the results, relevant variables within the model were changed creating several different scenarios. These calculations showed that resulting recommendations varied clearly for larger sectors within the investigated area depending on the specific assumptions. Nevertheless, some sectors were identified with relatively high reliability showing high suitability for residential areas with regard to the particular environmental concerns.

Though there is an extensive demand to pursue the study further, this approach can be regarded as a flexible tool for the modeling of a decision making process like the considered one and also under specific circumstances as a useful instrument to generate a rational comprehensible evaluation basis for urban planning.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>II</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Lösungsansatz.....	4
1.3 Untersuchungsgebiet.....	6
1.4 Zielsetzung und Struktur der Arbeit.....	10
<b>2. Literaturüberblick</b>	<b>14</b>
2.1 Definition und erster Einstieg.....	14
2.2 Hinleitung auf den Lösungsansatz.....	17
<b>3. Theoretische Grundlagen</b>	<b>25</b>
3.1 Beurteilungskriterien.....	29
3.1.1 Ermittlung der Beurteilungskriterien.....	29
3.1.2 Aufbereitung der Kriterienkarten.....	30
3.2 Constraints.....	36
3.3 Alternativen.....	37
3.4 Präferenzen des Entscheidungsträgers.....	38
3.5 Entscheidungsregeln.....	42
3.5.1 Weighted Linear Combination (WLC).....	42
3.5.2 Ordered Weighted Average (OWA).....	43
3.5.3 Analytic Hierarchy Process (AHP).....	51
3.5.4 Kombination von AHP und OWA.....	51
3.6 Sensitivitätsanalyse.....	52

<b>4.</b>	<b>Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht</b>	<b>54</b>
4.1	Beurteilungskriterien.....	54
4.1.1	Schutz vor umweltspezifischen Vorbelastungen .....	60
4.1.1.1	Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen .....	60
4.1.1.2	Schutz vor verkehrlichen Schallimmissionen .....	69
4.1.1.3	Schutz vor gewerblichen Immissionen .....	75
4.1.1.4	Schutz vor Luftschadstoffen .....	79
4.1.2	Schutz vorhandener Umweltqualitäten .....	85
4.1.2.1	Schutz des Freiraums .....	86
4.1.2.2	Schutz der Natur .....	90
4.1.2.3	Schutz des Trinkwassers .....	96
4.2	Constraints .....	100
4.3	Präferenzen des Entscheidungsträgers (Factor Weights) .....	104
4.3.1	Präferenzen Ebene 1 .....	105
4.3.2	Präferenzen Ebene 2 .....	105
4.3.3	Präferenzen Ebene 3 .....	110
4.4	Entscheidungsregeln (Order Weights) .....	113
4.4.1	Datenaggregation Ebene 3 .....	113
4.4.1.1	Eignungskarte auf Basis der schädlichen Bodenveränderungen .....	113
4.4.1.2	Eignungskarte auf Basis der Luftschadstoffe .....	118
4.4.2	Datenaggregation Ebene 2 .....	122
4.4.2.1	Eignungskarte auf Basis der Vorbelastungen .....	122
4.4.2.2	Eignungskarte auf Basis der Umweltqualitäten .....	129
4.4.3	Gesamteignungskarte (Datenaggregation Ebene 1) .....	137
<b>5.</b>	<b>Planungsempfehlungen</b>	<b>154</b>
<b>6.</b>	<b>Evaluation</b>	<b>160</b>
6.1	Zusammenfassung .....	160
6.2	Erfordernis zur Weiterführung .....	161
6.2.1	Weiterführung in inhaltlicher Hinsicht .....	162
6.2.2	Weiterführung in methodischer Hinsicht .....	164
6.3	Einschätzung der Nutzbarkeit des Ansatzes für die Stadtplanung .....	167
	<b>Verwendete Gesetze und Verordnungen</b>	<b>171</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>175</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Untersuchungsgebiet Duisburg .....	6
Abbildung 1-2:	Duisburg-Bruckhausen .....	7
Abbildung 1-3:	Struktur der Arbeit .....	12
Abbildung 3-1:	Modellhafter Ablauf eines multikriteriellen räumlichen Entscheidungsprozesses .....	26
Abbildung 3-2:	Lineare Fuzzy Membership Funktionen .....	34
Abbildung 3-3:	Fuzzy Membership S- und J-Funktionen .....	35
Abbildung 3-4:	Kontinuum der Entscheidungsregeln im OWA-Ansatz .....	46
Abbildung 4-1:	Hierarchische Strukturierung der Entscheidungssituation (Zielpyramide / Entscheidungsbaum) .....	57
Abbildung 4-2:	Eignungskarten auf Basis Arsen: Gegenüberstellung HGW 1 und HGW 3 .....	65
Abbildung 4-3:	Oberbodenbelastung (Arsen): Eingangsdaten und Eignungskarte .....	66
Abbildung 4-4:	Oberbodenbelastung (Blei): Eingangsdaten und Eignungskarte .....	67
Abbildung 4-5:	Oberbodenbelastung (BaP): Eingangsdaten und Eignungskarte .....	67
Abbildung 4-6:	Oberbodenbelastung (Cadmium): Eingangsdaten und Eignungskarte .....	68
Abbildung 4-7:	Verkehrliche Schallimmissionen: Eingangsdaten und Eignungskarte .....	73
Abbildung 4-8:	Gewerbeemissionen: Eingangsdaten und Eignungskarte .....	77
Abbildung 4-9:	Luftschadstoffe (Feinstaub PM10): Eingangsdaten und Eignungskarte .....	83
Abbildung 4-10:	Luftschadstoffe (Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub> ): Eingangsdaten und Eignungskarte .....	84
Abbildung 4-11:	Freiraumsituation und Eignungskarte .....	89
Abbildung 4-12:	Naturschutz: Eingangsdaten und Eignungskarte .....	95
Abbildung 4-13:	Trinkwasserschutz: Eingangsdaten und Eignungskarte .....	99
Abbildung 4-14:	Hinleitung zur Constraint Map .....	103
Abbildung 4-15:	Gesamteignungskarten Bodenbelastung: MIN / MAX .....	115
Abbildung 4-16:	Gesamteignungskarten Bodenbelastung: WLC / OWA [0,7/0,2/0,1/0] .....	117
Abbildung 4-17:	Gesamteignungskarten Luftschadstoffe: MIN / MAX .....	119
Abbildung 4-18:	Gesamteignungskarten Luftschadstoffe: WLC / OWA [0,7/0,3] .....	120
Abbildung 4-19:	Eignungskarten Vorbelastung: MIN / OWA [0,7/0,2/0,1/0] .....	124
Abbildung 4-20:	Eignungskarten Vorbelastung: OWA [0,65/0,2/0,1/0,05] / OWA [0,5/0,25/0,15/0,1] .....	124
Abbildung 4-21:	Eignungskarten Vorbelastung: WLC / MAX .....	125

Abbildung 4-22:	Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Vorbelastungen) .....	127
Abbildung 4-23:	Eignungskarten Umweltqualitäten: MIN / OWA [0,7/0,3/0] .....	131
Abbildung 4-24:	Eignungskarten Umweltqualitäten: OWA [0,7/0,2/0,1] / OWA [0,5/0,3/0,2] .....	131
Abbildung 4-25:	Eignungskarten Umweltqualitäten: WLC / MAX .....	132
Abbildung 4-26:	Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Umweltqualitäten) .....	133
Abbildung 4-27:	Spannweite der Werteausprägungen im Themenfeld Vorbelastungen .....	135
Abbildung 4-28:	Spannweite der Werteausprägungen im Themenfeld Umweltqualitäten .....	135
Abbildung 4-29:	Gesamteignungskarten: MIN / MAX .....	139
Abbildung 4-30:	Gesamteignungskarten: OWA [0,7/0,3] / WLC: Factor Weights (75/25) .....	140
Abbildung 4-31:	Gesamteignungskarten: OWA [0,7/0,3] / WLC: Factor Weights (25/75) .....	140
Abbildung 4-32:	Gesamteignungskarten: OWA [0,7/0,3] / WLC: Factor Weights (50/ 50) .....	141
Abbildung 4-33:	Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Gesamtumwelt - Factor Weights (75/25)) .....	146
Abbildung 4-34:	Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Gesamtumwelt - Factor Weights (50/50)) .....	146
Abbildung 4-35:	Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Gesamtumwelt - Factor Weights (25/75)) .....	147
Abbildung 4-36:	Spannweite der Werteausprägungen (Gesamtumwelt) über Factor-Weight-Kombinationen .....	150
Abbildung 4-37:	Spannweite der Werteausprägungen (Gesamtumwelt) über Order-Weight-Kombinationen .....	150
Abbildung 4-38:	Planungsempfehlungen auf Basis ausgewählter Szenarien .....	155

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Rating-Skala des paarweisen Vergleichs .....	40
Tabelle 4-1:	Prüfwerte der BBodSchV und ausgewählter Hintergrundwerte für NRW .....	63
Tabelle 4-2:	Schutzstatusspezifischer Raumwiderstand und resultierende Eignung .....	92
Tabelle 4-3:	Definition der Factor Weights im Themenfeld Vorbelastungen .....	106
Tabelle 4-4:	Definition der Factor Weights im Themenfeld Umweltqualitäten .....	109
Tabelle 4-5:	Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Vorbelastungen) .....	126
Tabelle 4-6:	Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Umweltqualitäten) .....	133
Tabelle 4-7:	Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Gesamtumwelt) .....	145

## Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytic Hierarchy Process
BauGB	Baugesetzbuch
BBK	Bodenbelastungskarte
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz
GIS	Geographisches Informationssystem
GLB	Geschützter Landschaftsbestandteil
HGW	Hintergrundwert
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
LG NRW	Landschaftsgesetz NRW
LWG NRW	Landeswassergesetz NRW
LSG	Landschaftsschutzgebiet
LUA	Landesumweltamt NRW (heute: LANUV)
MADM	Multiattribute Decision Making (multiattributive Entscheidungsfindung)
MCDA	Multicriteria Decision Analysis (multikriterielle Entscheidungsanalyse)
MCDM	Multicriteria Decision Making (multikriterielle Entscheidungsfindung)
MODM	Multiobjective Decision Making (multiobjektive Entscheidungsfindung)
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NRW	Nordrhein-Westfalen
NSG	Naturschutzgebiet
OWA	Ordered Weighted Average
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PM <sub>10</sub>	Feinstaubpartikel bis zu einer Größe von maximal 10 µm
SAW	Simple Additive Weighting
SIP	Schallimmissionspegel
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TWS-Zone	Trinkwasserschutzzone

WHG	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz)
WLC	Weighted Linear Combination
WSG	Wasserschutzgebiet

## 1. Einführung

### 1.1 Problemstellung

Im Gesamtkomplex kommunaler Aufgaben kommt der Stadtplanung eine bedeutende Rolle zu. Sie dient vor dem Hintergrund der kommunalen Selbstverwaltung und Planungshoheit dazu, die Flächennutzung innerhalb des Gemeindegebiets zu steuern und ist in dieser Hinsicht als Ausdruck eines politisch-administrativen Gestaltungs- und Entscheidungsprozesses zu verstehen.

Eine sachgerechte Stadtplanung ist dabei grundsätzlich als querschnittsorientierte Aufgabe zu betrachten, welche die Anforderungen zahlreicher Fachplanungen ebenso wie die Ansprüche unterschiedlichster weiterer Akteure an Grund und Boden im Hinblick auf die Gestaltung der stadtstrukturellen Gesamtverhältnisse zielgerichtet vereinbaren muss.

Das wesentliche normative Fundament der Stadtplanung bildet in Deutschland bundeseinheitlich das Baugesetzbuch (BauGB), in dem die grundlegenden Anforderungen an die städtebauliche Steuerung der Bodennutzung und die rechtlichen Beziehungen des Menschen zum Grund und Boden geregelt werden. Als zentrale Instrumente des Städtebaurechts sind die beiden Ebenen der Bauleitplanung, die Flächennutzungs- und die Bebauungsplanung, ausgeformt. Während erstere als vorbereitende Bauleitplanung für das gesamte Gemeindegebiet die an den jeweiligen Zielsetzungen orientierte beabsichtigte Art der Bodennutzung entsprechend der erwarteten bzw. voraussehbaren Bedürfnisse in den Grundzügen entwickelt, werden auf der zweiten Ebene der Bauleitplanung für einen bestimmten in der Regel deutlich kleineren Bereich des Gemeindegebiets die konkreten rechtsverbindlichen Festsetzungen zur zulässigen Bodennutzung der betroffenen Grundflächen dargestellt (vgl. BauGB, §§ 5, 8).<sup>1</sup>

§ 1 BauGB gibt einen Überblick über die zentralen auf beiden Stufen der Bauleitplanung geltenden materiellen Vorschriften. Das übergeordnete Ziel der Bauleitplanung besteht demnach in der Gewährleistung einer nachhaltigen städtebaulichen Entwicklung, in der die sozialen, wirtschaftlichen und umweltschützenden Anforderungen auch in Verantwortung gegenüber künftigen Generationen miteinander in Einklang gebracht werden. Neben einer dem Wohl der Allgemeinheit dienenden sozialgerechten Boden-

---

<sup>1</sup> Da die beiden unterschiedlichen Ebenen der Bauleitplanung in dieser Arbeit nicht im Vordergrund stehen, wird auf die Differenzierung hier nicht vertiefend eingegangen. Einen Einstieg in dieses Thema bietet eine große Vielfalt entsprechender Fachliteratur (vgl. u. a. Stürer, 2006, S. 33 ff. / 52 ff. / Kuschnerus, 2005, S. 36 ff. / Battis/Krautzberger/Löhr, 2007, S. 27 f.).

ordnung sind u. a. sowohl eine menschenwürdige Umwelt zu sichern als auch die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln (vgl. BauGB, § 1 Abs. 5). Zur Konkretisierung der einzelnen Elemente dieses allgemeinen Oberziels wird durch das BauGB im Weiteren eine umfangreiche nicht abgeschlossene Liste an beispielhaften Belangen formuliert, die bei der Aufstellung von Bauleitplänen zu berücksichtigen sind. Im Kern handelt es sich dabei um eine breite Vielfalt unterschiedlichster Planungsleitlinien, die im Hinblick auf die Entwicklung der Flächennutzung grundsätzlich verfolgt werden können bzw. im konkreten Fall in einem als erforderlich angesehenem Maße beachtet werden sollen. Aufgabe der Stadtplanung ist es, diese mitunter erhebliche Anzahl an öffentlichen und privaten Belangen gerecht gegeneinander und untereinander abzuwägen (vgl. BauGB, § 1 Abs. 7).

Da jeder der in diese Abwägung einfließenden Belange unter Umständen im Sinne der letztlich zu treffenden Entscheidung zu Gunsten anderer Aspekte zurückgestellt werden kann, kommt im Rahmen einer rechtsstaatlichen Planung einem gerechten Abwägungsvorgang eine außerordentlich hohe Bedeutung zu.

Wesentliche Voraussetzung hierfür ist in einem ersten Schritt die umfassende Ermittlung aller positiv wie negativ berührten relevanten Belange sowie die Bewertung der konkreten Betroffenheit im Hinblick auf die anvisierte Planung. Je gravierender die potenziellen Folgen für einen speziellen Belang sind, umso größere Bedeutung wird vielfach der Rechtfertigung seiner potenziell erforderlichen Überwindung zukommen. Allerdings kann sich auch eine stadtplanerische Abwägung nicht über ggf. für die einzelnen Belange geltende Rechtsgrundlagen hinwegsetzen, so dass sich auf diese Weise mitunter auch aus einem einzelnen Aspekt unüberwindbare Hindernisse für die Planung ergeben können. In einem weiteren Schritt sind die einzelnen Belange unter Berücksichtigung der zu definierenden relativen Wichtigkeit einander gegenüberzustellen, um auf dieser Basis und unter der Vorgabe des aus dem Rechtsstaatsprinzip abgeleiteten Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit über einen sachgerechten Ausgleich entscheiden zu können (vgl. Kuschnerus, 2005, S. 115 ff. / Battis/Krautzberger/Löhr, 2007, S. 60 ff. / Stür, 2006, S. 331 ff.).

Insgesamt kann es sich bei der Vorbereitung einer (sach-) gerechten Abwägung je nach konkretem Planungsfall um eine hochkomplexe Aufgabe handeln. Während eine solche im Rahmen eines in der Regel verhältnismäßig kleinräumigen Bebauungsplans häufig noch überschaubar ist, muss die Komplexität bezogen auf die in der Flächennutzungsplanung zum Ausdruck gebrachte umfassende gemeindliche Zielvorstellung für die zukünftige Entwicklung einer ganzen (Groß-)Stadt als erheblich angesehen werden.

Für das in dieser Arbeit zu betrachtende Thema muss jedoch aus dem Gesamtumfang stadtplanerischer Handlungsfelder zwingend eine Auswahl getroffen werden.

Mit der Fokussierung auf die geeignete Verräumlichung der Nutzungsform „Wohnen“, d. h. der stadtplanerisch motivierten Ermittlung geeigneter Standorte für die Errichtung von Wohnbebauung, wird ein Element einer umfassenden Stadtentwicklungsplanung herausgegriffen, das nicht zuletzt aufgrund seiner für alle Städte relevanten Bedeutung ein spannendes Themenfeld darstellt.

Auch die planerische Steuerung einer zukünftigen Entwicklung des Wohnungsmarktes wird durch ein vielfältiges Interessensgeflecht verschiedener Belange beeinflusst. Die Beurteilung unterschiedlicher Bereiche des jeweiligen Stadtgebiets im Hinblick auf das anvisierte Planungsziel „Wohnnutzung“ wird dabei in Abhängigkeit von dem betrachteten Belang vielfach in hohem Maße unterschiedlich ausfallen. Die auf den jeweils geltenden normativen Grundlagen oder anderen mehr oder weniger verbindlichen Anforderungen beruhenden einzelnen Zielsetzungen und die daraus resultierenden Flächenbewertungen werden gelegentlich in gleiche Richtungen weisen, mitunter sich aber auch konfliktreich und zum Teil unvereinbar entgegenstehen. Dennoch besteht auch in diesem Zusammenhang das aufgezeigte Erfordernis, eine auf Basis aller relevanten Belange gerecht abgewogene Entscheidung für bestimmte Standorte zu treffen.

### 1.2 Lösungsansatz

Angesichts der im letzten Abschnitt aufgezeigten Problemstellung ergibt sich die Frage, inwieweit Möglichkeiten bestehen, zumindest die Lösung eines Teils der komplexen Entscheidungsproblematik mit technischen Mitteln zu unterstützen.

Da sich zahlreiche der für die Abwägung relevanten Aspekte häufig unmittelbar räumlich zum Ausdruck bringen lassen, kann zumindest für diese Themenbereiche der Einsatz geographischer Informationssysteme (GIS) möglicherweise eine erste Hilfestellung bieten. Dabei können GIS aufgrund ihrer Fähigkeit zur Verwaltung und Darstellung insbesondere aber auch zur Bearbeitung und Analyse großer Mengen raumbezogener Daten wertvolle Werkzeuge sein. Durch die Anwendung unterschiedlicher GIS-Funktionalitäten können nicht zuletzt Daten so aufbereitet werden, dass sie als fachlich fundierte zielgerichtete Beurteilungsgrundlage für die nutzungsspezifische Eignung räumlicher Einheiten dienen können.

Um auf Basis der auf diese Weise entstandenen in der Regel vielfältigen räumlich ausgeprägten Beurteilungsgrundlagen letztlich eine Entscheidung treffen zu können, im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung also an welchem Standort (unter Berücksichtigung der relevanten umweltspezifischen Gesichtspunkte) eine bestmögliche Verortung der anvisierten Wohnnutzung gewährleistet wäre, besteht jedoch darüber hinaus die Notwendigkeit, die einzelnen Informationen in einer problemangepassten Weise für eine Gesamtbewertung aufbereitet zusammenzuführen.

Methoden aus dem breiten nicht vorrangig räumlich ausgerichteten Themenfeld des „Multicriteria Decision Making“ (MCDM) bzw. der „Multicriteria Decision Analysis“ (MCDA) können in dieser Hinsicht einen unverzichtbaren Beitrag für eine derartige Aggregation leisten. Zusätzlich werden hierüber Verfahren angeboten, unterschiedliche Präferenzen entscheidungsrelevanter Akteure in die Zusammenführung einzubeziehen. Der kombinierte Einsatz von GIS- und MCDA-Funktionalitäten könnte somit eine viel versprechende Möglichkeit bieten, die Entscheidungsfindung auf Basis einer angemessenen umfassenden Modellierung der zugrunde liegenden räumlichen Problemsituation in erheblichem Maße zu unterstützen.

Aus diesem Grund soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Kombination ausgewählter Methoden beider Themenbereiche zum Einsatz kommen, um die Anwendbarkeit für die zugrunde liegende Fragestellung zu prüfen.

Während in anderen Studien mittels einer Verbindung von GIS und multithematischen Bewertungsverfahren beispielsweise das Attraktivitätspotenzial von (Wohn-)Standorten

## 1. Einführung

---

auf Basis infrastruktureller Aspekte beurteilt wird (vgl. u. a. Prinz, 2003), soll in der vorliegenden Arbeit die Einschätzung der Flächeneignung für die Errichtung von Wohnbebauung unter Berücksichtigung umweltspezifischer Gesichtspunkte das zentrale Thema darstellen.

### 1.3 Untersuchungsgebiet

Aufgrund der besonderen planerischen Relevanz unterschiedlicher Umweltthemen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Stadt Duisburg als Untersuchungsgebiet im Blickfeld der Betrachtungen stehen. Auch wenn die Datensätze zum Teil so verändert wurden, dass aus den angefertigten Karten keine flächenspezifischen Informationen über die im Einzelnen realen Gegebenheiten vor Ort abgeleitet werden können, wird durch die jeweiligen Ausführungen die prinzipielle Bedeutung offenbar, die einem Einbezug der entsprechenden Umweltbelange in der Stadtplanung zukommt.

Duisburg ist mit einer Bevölkerung von 496.665 Einwohnern im Jahr 2007 eine der einwohnerstärksten deutschen Großstädte bei einer Fläche von 232,81 km<sup>2</sup> (vgl. LDS NRW, 2008). Die Stadt liegt als westliche Flügelstadt des Ballungsraums Ruhrgebiet an der Mündung der Ruhr in den Rhein, der als bedeutendste europäische Wasserstraße das Stadtgebiet auf knapp 40 km von Süden nach Norden durchströmt. Administrativ bildet Duisburg einen Teil des Regierungsbezirks Düsseldorf innerhalb des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen (NRW).

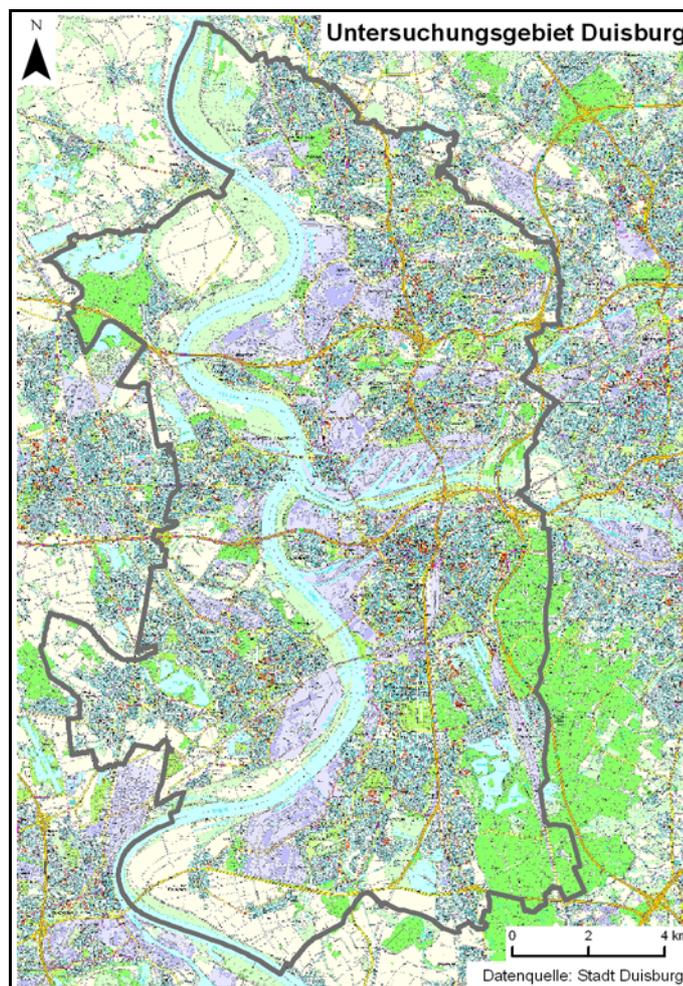


Abb. 1-1: Untersuchungsgebiet Duisburg

## 1. Einführung

---

Die wirtschaftliche Entwicklung der Stadt wurde in einem Großteil der industriell geprägten Vergangenheit durch die Montanindustrie gekennzeichnet. Auch wenn im Juni 2008 das letzte noch aktiv fördernde Steinkohlenbergwerk auf dem Stadtgebiet geschlossen wurde, besitzt die Stahlproduktion neben zahlreichen anderen Betrieben des industriellen Sektors nach wie vor eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung. Abb. 1-1 stellt die zum Teil große räumliche Nähe zwischen den überwiegend entlang des östlichen Rheinufer verorteten großflächigen Industriegebieten (violett) sowie den im Mündungsbereich der Ruhr gelegenen umfangreichen Hafenanlagen (violett) und den Siedlungsbereichen dar (blau) (vgl. auch Abb. 1-2).<sup>2</sup>



**Abb. 1-2: Duisburg-Bruckhausen (Quelle: Eigene Aufnahme Oktober 2008)**

Ebenso zeigen sich vielfach nur geringe Distanzen zwischen durch dichte Wohnbebauung geprägten Stadtteilen und mehreren durch das Stadtgebiet verlaufenden Autobahnen. Auf verschiedene der u. a. hieraus resultierenden umweltspezifischen Konsequenzen wird im Rahmen dieser Arbeit einzugehen sein.

Auf der anderen Seite ist Duisburg aber auch gekennzeichnet durch zum Teil weiträumige überwiegend entlang ausgewählter Rheinuferabschnitte und in den Außenbereichen des Stadtgebiets verorteten Landschafts- und Naturschutzgebiete sowie im äußersten Norden der Stadt durch ein unter den Schutz der Europäischen Union fallendes „NATURA-2000“-Gebiet. Auch wenn der Waldanteil mit 8,4 % deutlich unterhalb des

---

<sup>2</sup> Vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit enthaltenen großen Anzahl an Karten und des damit verbundenen Speichervolumens stellt auch die in Abb. 1-1 dargestellte Übersichtskarte einen Kompromiss zwischen einer möglichst guten Übersicht und einer gleichzeitig möglichst geringen Erhöhung der Speichergröße dar. Trotz zahlreicher Versuche ließ sich mit dem verfügbaren Datenmaterial kein besseres Ergebnis erzielen, ohne die Dateigröße in erheblichem Maße zu steigern. Für eine einleitende orientierende Übersicht wurde die Karte jedoch angesichts des erforderlichen Kompromisses als angemessen erachtet. Für eine detailliertere Ansicht des Stadtplans sei beispielsweise auf die Homepage der Stadt Duisburg verwiesen (<http://www.duisburg.de/gis/stadtplan/hrclient/stadtplan.php>) (Stand: 26.10.2008).

Durchschnitts der anderen Großstädte im Bundesland (12,5 %), des Regierungsbezirks Düsseldorf (14,9 %) und des Landes NRW (25,4 %) liegt, lassen sich im Nordwesten und (Süd-)Osten großräumigere Waldflächen erkennen (vgl. LDS NRW, 2008). Auch aus diesen Umweltbelangen sind Auswirkungen auf die Stadtplanung zu erwarten, die im Weiteren in die Betrachtungen einzubeziehen sind.

Die räumlich zum Teil außerordentlich nahe Koexistenz von verschiedenen Formen umweltspezifischer Vorbelastungen und Qualitäten führt dazu, dass Duisburg als interessantes Untersuchungsgebiet für die vorliegende Arbeit angesehen werden kann.

Die besondere Bedeutung der Umweltsituation (im Untersuchungsgebiet) für die im Weiteren zu betrachtende Wohnbebauung kann mit gewissen Einschränkungen einer im Jahr 2003 verfassten Studie zu den Determinanten der Stadt-Umland-Wanderungen im Ruhrgebiet entnommen werden, die vor dem Hintergrund der zum damaligen Zeitpunkt nach wie vor erheblichen Bevölkerungsrückgänge der Kernstädte des Ruhrgebiets erstellt wurde (vgl. Blotevogel/Jeschke, 2003). Allein für Duisburg ließ sich von 1992 bis 2002 ein Bevölkerungsrückgang von mehr als 30.000 Einwohnern verfolgen, bis zum Jahr 2007 hat sich dieser um weitere knapp 12.000 Einwohner ausgeweitet (vgl. LDB NRW, 2008).

Auf Basis einer Befragung der in den Jahren 2000 und 2001 in den Nahbereich, d. h. in Nachbarstädte oder in kreisangehörige Umlandgemeinden, umgezogenen Haushalte wurden u. a. die Motive der Wohnstandortverlagerung ermittelt. Neben privaten und beruflichen Gründen konnte die Motivation für die Abwanderung dabei in zahlreichen Fällen auf vornehmlich zwei Kriterienbündel zurückgeführt werden. Zum einen kommt der Qualität und Größe der Wohnung eine hohe Bedeutung zu, zum andern spielt die Qualität des Wohnorts vielfach eine entscheidende Rolle, wobei vor allem die Umweltsituation und das soziale Umfeld von den befragten Personen häufig als relevante Faktoren angegeben wurden. Im Hinblick auf die Abwanderungen aus einigen Stadtteilen der größeren Städte konnten diese Aspekte sogar als massive „Push-Faktoren“ identifiziert werden. Neben verschiedenen Stadtteilen im hier relevanten Untersuchungsgebiet, sind derartige Ergebnisse auch für Bereiche in Dortmund, Gelsenkirchen, Herne und Essen ermittelt worden.

Auch wenn beachtet werden muss, dass es sich bei der betrachteten Studie in erster Linie um eine Momentaufnahme handelt, sollte dennoch geprüft werden, inwieweit aus diesen auf einem verhältnismäßig umfangreichen Fundament basierenden Signalen planerische Konsequenzen abzuleiten sind.

Zunächst ergibt sich demnach das Erfordernis, in den relevanten im Übrigen hinsichtlich der Problemlagen vielfach nicht unbekanntem Stadtteilen durch entsprechende Maßnahmen die Wohnumfeldqualität sowohl im Hinblick auf die Umweltsituation als auch auf eine Verbesserung bzw. Stabilisierung des sozialen Gefüges nach Möglichkeit zu steigern.

Allerdings müssen die Erfolgsaussichten für eine deutliche Aufwertung der Umweltbedingungen wie in vielen anderen vergleichbaren Großstädten für bestimmte Bereiche des Stadtgebiets oftmals zumindest mittelfristig als sehr gering angesehen werden. Auf bestehende hohe verkehrliche Belastungen und zum Teil erhebliche industrielle Emissionen kann mit stadtplanerischen Mitteln in einem stark verdichteten Ballungsraum vielfach allenfalls in sehr begrenztem Maße vermindern eingewirkt werden. Auf die für Duisburg nicht selten zu beobachtende große räumliche Nähe zwischen unterschiedlichen Emittenten und schutzbedürftigen Wohnnutzungen ist im Vorfeld bereits hingewiesen worden.

Insofern muss vor allem der Steuerung des Wohnungsmarktes in Bezug auf Art und Lage des künftigen Angebots im Rahmen einer großräumigen Stadtentwicklungsplanung besondere Aufmerksamkeit zukommen.

Um den beschriebenen Bevölkerungsrückgängen entgegen zu wirken, muss sich das Wohnungsangebot dabei in deutlich größerem Maße den sich aus einer Pluralisierung der Lebensstile ergebenden unterschiedlichen Wohnbedarfen anpassen.

Auch wenn hierzu auch zukünftig die Neuausweisungen vereinzelter weiterer Wohngebiete erforderlich sein wird, ist angesichts des anhaltenden „Mismatch“ zwischen Wohnungsangebot und Wohnungsnachfrage vor allem eine Veränderung des Bestands notwendig. Mit der von Blotevogel/Jeschke erstellten Studie konnte gezeigt werden, dass sich auch im Hinblick auf Haushalte mit überdurchschnittlichem Einkommen ein beträchtlicher Teil der betrachteten Umzüge auf dem Mietwohnungsmarkt abgespielt hat.

Neben der Umnutzung und Nachverdichtung bestehender Wohngebiete sowie einer nach Möglichkeit Wiedernutzbarmachung brach gefallener Flächen wird angesichts der in Zukunft zu erwartenden sich auf den Wohnungsmarkt auswirkenden Folgen des demographischen Wandels auch der Aspekt des Rückbaus (zunehmend) in das Blickfeld der Stadtplanung rücken.

Bei der Ermittlung geeigneter Standorte für zukünftige Konzentrations- und Dekonzentrationsgebiete müssen auch Umweltgesichtspunkte verstärkte Berücksichtigung finden, um in einem aller Wahrscheinlichkeit nach anhaltenden Wettbewerb der Städte um Einwohner die relative Position zumindest nicht zu verschlechtern.

### **1.4 Zielsetzung und Struktur der Arbeit**

Wie dargelegt muss eine (sach-)gerechte Stadtentwicklungsplanung notwendigerweise eine Vielzahl unterschiedlicher mitunter mehr oder weniger schwer wiegender Belange berücksichtigen. Die letztlich erforderlichen Entscheidungen sind dabei auf Basis von in dieser Hinsicht multiplen nicht selten teils gleich-, teils entgegen gerichteten Einzelbewertungen zu treffen, die ihrerseits in ihrer Zielbestimmung jeweils auf speziellen aus normativen Regelungen und / oder anderen häufig extern vorgegebenen Anforderungen beruhen. Vor allem bei großräumigen Planungen kann aus einem derartigen vielschichtigen Geflecht an Einzelbeurteilungen schnell eine hohe Komplexität resultieren, aus der u. a. eine erhöhte Gefahr entsteht, wesentliche Aspekte in der abschließenden Entscheidung zu vernachlässigen.

Als Hypothese soll der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegt werden, dass der kombinierte Einsatz der geographischen Informationsverarbeitung und der multikriteriellen Entscheidungsanalyse entliehener Methoden einen wertvollen Ansatz darstellen kann, die Entscheidungsfindung auch in dem aufgezeigten Zusammenhang vorzubereiten und zu unterstützen. Hierbei steht vor allem die Ordnung der einzelnen entscheidungsrelevanten Themenfelder, deren jeweils fachlich fundierte Aufbereitung sowie strukturierte Zusammenführung entsprechend der jeweiligen Anforderungen im Vordergrund, um letztlich eine umfassende intersubjektiv rational nachvollziehbare (einheitliche) Beurteilungsgrundlage für vornehmlich Stadtentwicklung betreibende Planungsträger zu erzeugen.

Eine umfassende Anwendung eines solchen Ansatzes auf die breite und tiefe Vielfalt des beschriebenen Themenfelds ist in dieser Arbeit jedoch keinesfalls zu leisten, so dass zwingend eine Beschränkung auf ausgewählte Aspekte erfolgen muss. Dabei wird unter Ausblendung sowohl zahlreicher stadtplanerisch relevanter Handlungsschwerpunkte als auch einzubeziehender Belange die Konzentration auf die Ermittlung geeigneter Bereiche für die Realisierung von Wohnbebauung unter Berücksichtigung verschiedener umweltspezifischer Gesichtspunkte gerichtet.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist somit auf zwei Ebenen angesiedelt:

Auf einer eher operativen Ebene sollen auf Basis der zur Anwendung kommenden konkreten Modellierung die Flächen des Untersuchungsgebietes ermittelt werden, die unter Berücksichtigung der einbezogenen Umweltaspekte als geeignet für die Errichtung von Wohnbebauung angesehen werden können.

Auf einer eher strategischen Ebene ist auf dieser Grundlage zu prüfen, inwieweit der gewählte aus einer Kombination verschiedener Methoden bestehende Ansatz ein prinzipiell sinnvolles Instrument darstellen kann, um die Entscheidungsfindung im Rahmen der Stadtplanung mit verlässlichen Ergebnissen zu unterstützen. Dabei ist insbesondere auch der nach wie vor als experimentell angesehene „Ordered Weighted Average“-Ansatz (OWA) näher zu beleuchten. Inwieweit sein Einsatz innerhalb der insgesamt verfolgten Herangehensweise Vorteile bieten kann, ist einer besonderen Berücksichtigung zu unterziehen.

Insofern gilt es vor allem die drei folgenden Fragen zu beantworten:

- ❖ Für welche Bereiche des Untersuchungsgebiets kann auf Basis der konkreten Modellierung aus Sicht der betrachteten Umweltfaktoren eine Empfehlung zur Planung weiterer Wohnbebauung erfolgen?
- ❖ Kann der zur Anwendung gebrachte Lösungsansatz als geeignetes Mittel angesehen werden, um die Stadtplanung mit verlässlichen Ergebnissen zu unterstützen?
- ❖ Können die Methoden des OWA-Ansatzes als sinnvoll angesehen werden, um die Problemsituation angemessen zu modellieren?

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit kann der folgenden Abbildung entnommen werden:

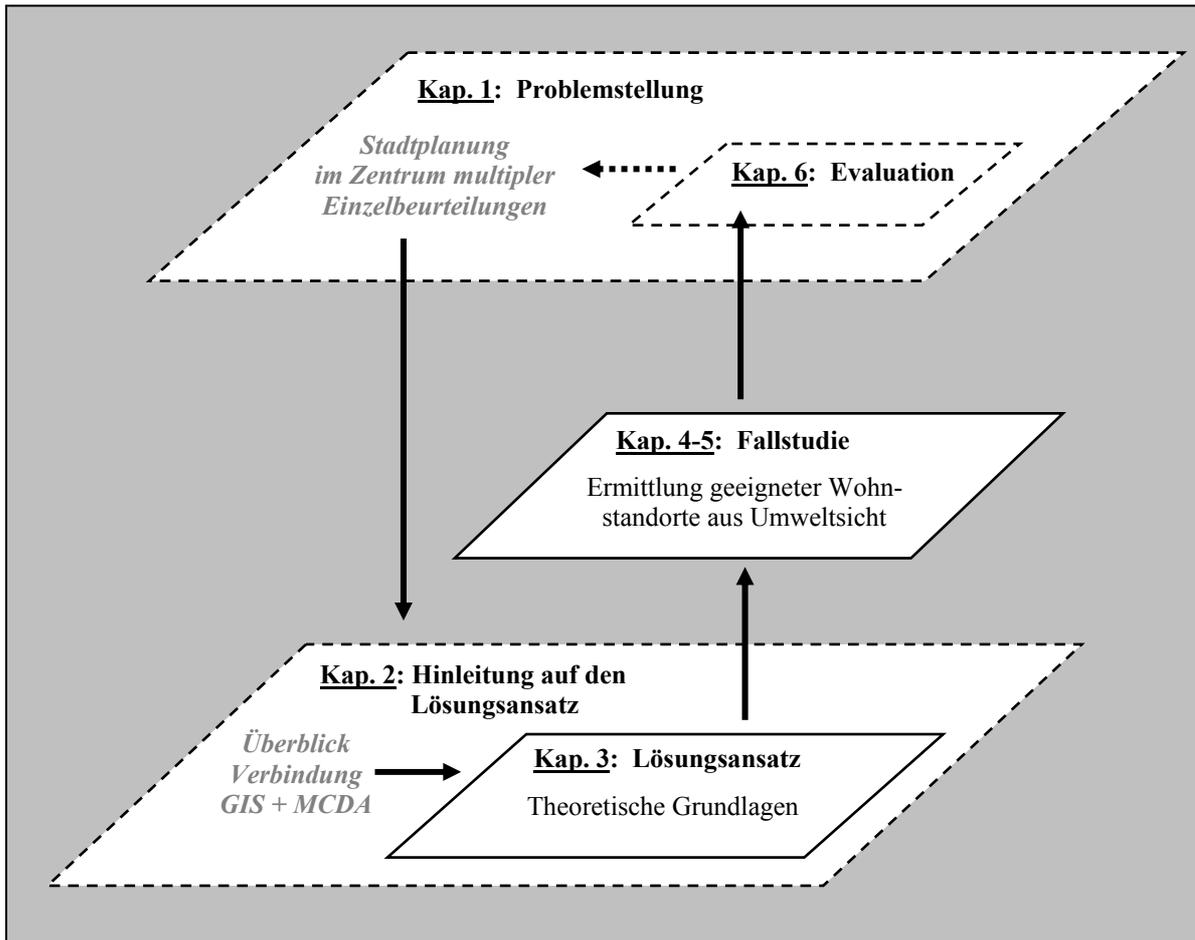


Abb. 1-3: Struktur der Arbeit

Im gegenwärtigen ersten Kapitel wird vor allem die komplexe Aufgabe der Stadtplanung aufgezeigt, in einem vielschichtigen Geflecht unterschiedlichster Belange die grundlegende Form der Bodennutzung koordiniert und zielgerichtet zu steuern. Die umfangreiche Gesamthematik wird darüber hinaus auf einen bestimmten Themenbereich eingegrenzt und auf ein ausgewähltes Untersuchungsgebiet bezogen.

Da als Lösungsansatz für die definierte Problemstellung eine Verbindung von Methoden aus dem Bereich der Geographischen Informationssysteme (GIS) und der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (Multicriteria Decision Analysis (MCDA)) zur Anwendung gebracht werden soll, bietet Kapitel 2 im Anschluss einen Einblick in das weite Feld der in der Literatur in diesem Zusammenhang diskutierten Themen sowie eine Hinleitung auf den in dieser Arbeit genutzten Ansatz.

Kapitel 3 stellt zunächst eine modellhafte Abbildung eines (räumlichen) Entscheidungsfindungsprozesses dar, um im Weiteren orientiert an den einzelnen Modellelementen

eine Auswahl wesentlicher theoretischer Grundlagen für die in dieser Arbeit verfolgte Vorgehensweise zu behandeln.

In Kapitel 4 werden die aufgezeigten Methoden auf die konkrete Fragestellung und das Untersuchungsgebiet bezogen. Dabei werden die für die Auswahl geeigneter Standorte als erforderlich angesehenen Umweltaspekte strukturiert, unter Berücksichtigung der im Einzelnen jeweils relevanten fachlichen Erfordernisse aufbereitet und sukzessive zu einer umfassenden Entscheidungsgrundlage bzw. unterschiedlichen Szenarien einer solchen zusammengeführt.

Nachdem in Kapitel 5 auf Basis der erfolgten Modellierung und ausgewählter Szenarien Planungsempfehlungen und somit die erarbeiteten Ergebnisse der operativen Ebene vorgestellt wurden, geht Kapitel 6 auf erforderliche weiterführende Punkte und verschiedene Resultate für die strategische Ebene ein und wirkt somit letztlich zurück auf die eingangs formulierte Problemstellung.

## 2. Literaturüberblick

Wie im letzten Kapitel aufgezeigt, muss eine (sach-)gerechte Stadtplanung im Hinblick auf die koordinierte zielgerichtete Steuerung der Bodennutzung Entscheidungen im Spannungsfeld multipler Einzelbeurteilungen treffen. Als möglicher Ansatz eine derartige Planungsaufgabe mit technischen Hilfsmitteln zu unterstützen, soll in dieser Arbeit eine Verbindung von Methoden aus dem Bereich der Geographischen Informationssysteme (GIS) und der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA) näher betrachtet werden. Hierzu gilt es im Folgenden zunächst einen kurzen Einblick in dieses breite Themenfeld zu geben sowie auf den im Weiteren zu verfolgenden Ansatz hinzuleiten.

### 2.1 Definition und erster Einstieg

Während grundlegende Kenntnisse zum Themenfeld der GIS an dieser Stelle vorausgesetzt werden, sei zunächst auf den zweiten der beiden angeführten Bereiche, MCDA, definitorisch näher eingegangen.

„Multicriteria Analysis“ kann entsprechend der “Encyclopedia of Geographic Information Science” verstanden werden als „a decision-aid and a mathematical tool allowing the comparison of different alternatives or scenarios according to many criteria, often conflicting, in order to guide the decision maker towards a judicious choice“ (Chakhar/Mousseau, 2008a, S. 747, zitiert nach Roy, 1996). Einen relativ aktuellen Überblick über das nicht vorrangig räumlich ausgerichtete interdisziplinär bedeutende und somit auch außerordentlich heterogene Themenfeld der MCDA bietet eine umfangreiche Publikation von Figueira/Greco/Ehrgott aus dem Jahr 2005.

Spatial Multicriteria Decision Making bezieht sich dabei nach der angeführten Enzyklopädie auf “the application of multicriteria analysis in spatial context where alternatives, criteria and other elements of the decision problem have explicit spatial dimensions” (Chakhar/Mousseau, 2008a, S. 747).

Herausragendes Ziel derartiger Ansätze ist somit die Unterstützung einer reflektierten Entscheidung für eine oder mehrere räumliche Alternativen unter Berücksichtigung verschiedener räumlicher und nicht-räumlicher entscheidungsrelevanter Belange. Der kombinierte Einsatz der spezifischen Stärken von GIS- und MCDA-Funktionalitäten kann dabei nach Ansicht verschiedener Autoren die Entscheidungsfindung durch eine angemessene, umfassende Modellierung der zugrunde liegenden räumlichen Problemsi-

tuation vielfach in erheblichem Maße unterstützen (vgl. Herzig, 2007, S. 7 ff., 19 / Malczewski, 1999, S. 79 f. / Chakhar/Martel, 2003, S. 48 f. / Thill, 1999, S. 3).

Die auf Basis unterschiedlicher umweltspezifischer Faktoren (sowie ggf. zwischen den beteiligten Akteuren differierender Einschätzungen hinsichtlich deren relativer Bedeutung) zu treffende Entscheidung für bestimmte Standorte zur Errichtung von Wohnbebauung kann nach Ansicht des Autors der vorliegenden Arbeit als ein Anwendungsfeld derartiger Entscheidungssituationen angesehen werden. Vor diesem Hintergrund wird eine Kombination von GIS- und MCDM-Methoden auch für die hier betrachtete Fragestellung als interessant und näher prüfenswert angesehen.

Hingewiesen sei an dieser Stelle darauf, dass entsprechend der zitierten Enzyklopädie auch in der vorliegenden Arbeit keine Unterscheidung der beiden in der Literatur häufig mehr oder weniger synonym genutzten Begrifflichkeiten „Multicriteria Decision Analysis“ (MCDA) und „Multicriteria Decision Making“ (MCDM) vorgenommen wird (Chakhar/Mousseau, 2008a, S. 747). Betont werden soll dabei aber, dass zumindest im vorliegenden Zusammenhang mit der Begrifflichkeit „Decision Making“ nicht der Eindruck erweckt werden soll, dass unter Anwendung der jeweiligen Methoden eine endgültige Entscheidung getroffen wird. Stattdessen kann es sich nur um die Vorbereitung einer solchen und über die Bereitstellung aggregierter Beurteilungsgrundlagen deren Unterstützung handeln.

Die in den letzten Jahren grundsätzlich gestiegene Bedeutung einer Verknüpfung von GIS- und MCDM-Methoden kann u. a. an der Entwicklung dieses Themenfeldes in der Fachliteratur beobachtet werden. Malczewski zeigt auf Basis einer Ermittlung von über 300 im Zeitraum von 1990 bis Ende 2004 erschienenen Fachartikeln, dass die Anzahl der Publikationen, in denen GIS- und MCDM-Themen miteinander verbunden wurden, über die betrachteten Jahre hinweg in erheblichem Maße gestiegen ist. Dies zusammen mit der Beobachtung, dass die Artikel in einer großen Anzahl vielfältiger Zeitschriften publiziert wurden, kann nach Malczewski als ein Hinweis auf die gestiegene Bedeutung einer GIS-MCDM-Verknüpfung für einen breiten Anwenderkreis bzw. ein weites inhaltliches Themenfeld angesehen werden (vgl. Malczewski, 2006b, S. 704 ff.).

Die Untersuchung der Art des jeweils zugrunde liegenden Entscheidungsproblems und des Anwendungsbereichs zeigt ebenfalls eine erhebliche Vielfalt, wobei den umweltbezogenen Fragestellungen und den „Land Suitability“-Entscheidungsproblemen eine besondere Bedeutung zukommt. Gerade der Themenbereich der Land Suitability, in dem

das Untersuchungsgebiet auf Basis eines Suitability Index hinsichtlich seiner zielgerichteten Eignung für ausgewählte Nutzungsformen beurteilt wird, ist für die vorliegende Arbeit von spezieller Relevanz.

Weitere Schwerpunkte in den betrachteten Publikationen liegen auf den Themenfeldern „Plan- / Scenario-Evaluation“ und „Site-Selection“ sowie den Anwendungsbereichen Transportwesen und Stadt- bzw. Regionalplanung. Eine Übersicht über verschiedene beispielhafte Arbeiten aus den angeführten aber auch darüber hinausgehenden unterschiedlichen Bereichen bietet Malczewski (vgl. Malczewski, 2006b, S. 715 f.). Bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit hat die Auseinandersetzung mit verschiedenen Fallstudien insbesondere aus den angeführten Bereichen vor allem dazu beigetragen, das Bewusstsein für wesentliche Aspekte in Bezug auf die Verknüpfung von GIS- und MCDM-Methoden zu schärfen.

Im Hinblick auf eine Verbindung von GIS- und MCDM-Funktionalitäten zu einem räumlichen Entscheidungsunterstützungssystem lassen sich in der Literatur eine große Anzahl an Arbeiten finden, welche die Systembildung unter Berücksichtigung unterschiedlicher konkreter inhaltlicher Fragestellungen betreiben. Eine Auseinandersetzung mit erforderlichen funktionalen Eigenschaften derartiger Systeme und eine darauf ausgerichtete klassifizierte Zusammenstellung zahlreicher Publikationen findet sich bei Herzig (vgl. Herzig, 2007, S. 7 ff., 16).

Verschiedene Arbeiten haben darüber hinaus die grundsätzliche Art der physikalischen bzw. technischen Verknüpfung der GIS- und MCDM-Funktionalitäten zu einem System betrachtet (vgl. Jankowski, 1995, S. 264 ff / Malczewski, 1999, S. 302 ff. / Chakhar/Martel, 2003, S. 57 ff.). In den meisten Fällen wird dabei, in Abhängigkeit vom Umfang der Integration der verschiedenen Komponenten in ein mehr oder weniger einheitliches System und der Art des Datenaustauschs zwischen diesen Komponenten, zwischen zwei bis drei Verbindungsstufen unterschieden. Eine relativ aktuelle Klassifikation kann in der Differenzierung zwischen einer losen Kopplung (loose coupling), einer engen Kopplung (tight bzw. deep coupling) und einer vollständigen Einbettung (embedded coupling) gesehen werden (vgl. Herzig, 2007, S. 17 ff. / Chakhar/Mousseau, 2008b, S. 754 f. / Jankowski, 2006, S. 293).

Eine konkrete Auseinandersetzung mit diesem in der Literatur viel diskutierten Thema wird im Weiteren nicht verfolgt. Dennoch sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit vor allem auf das Softwareprodukt IDRISI-Andes

zurückgegriffen wird, in dem sowohl GIS- als auch MCDM-Funktionalitäten in einer Anwendung implementiert sind.<sup>3</sup> Zusätzlich wird ein weiteres MCDM-Tool betrachtet, das durch die Einbindung einer zusätzlichen Softwarebibliothek MCDM-Funktionen unter dem Dach des Softwareprodukts ArcGIS 9.2 bereitstellt und somit ggf. als Beispiel einer engen Kopplung angesehen werden kann.

Bedeutender als die Art der Verbindung der Funktionalitäten zu einem mehr oder weniger einheitlichen System wurde für die vorliegende Arbeit jedoch die konkrete inhaltliche Einsatzfähigkeit einer derartigen Kombination für die betrachtete Fragestellung angesehen. Insofern werden sich die weiteren Ausführungen mit unterschiedlichen Ansätzen beschäftigen und dabei auf den in dieser Arbeit zu nutzenden hinleiten.

### **2.2 Hinleitung auf den Lösungsansatz**

Bei der inhaltlichen Annäherung an die multikriterielle Entscheidungsfindung stellt die Differenzierung in Multiobjektive Decision Making (MODM) und Multiattribute Decision Making (MADM) eine in der Literatur häufig genutzte Klassifikation dar. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale sind dabei die Art des zugrunde liegenden Problems und die verwendete Methodik zu dessen Lösung (vgl. Malczewski, 1999, S. 84 ff., 198, 258 f. / Jankowski, 1995, S. 254 / Chakhar/Martel, 2003, S. 49 / Herzig, 2007, 68 ff.).

In multiattributiven Entscheidungsproblemen (MADM) ist auf Basis verschiedener ausdrücklich formulierter Attribute eine Entscheidung zwischen einer begrenzten Anzahl diskret vordefinierter Alternativen zu treffen. Die Attribute dienen in diesem Zusammenhang dazu, die einzelnen Alternativen hinsichtlich des Ausmaßes zu beurteilen, in dem die für die Entscheidung relevanten Ziele erreicht werden.

Multiobjective Decision Making versucht demgegenüber eine optimale Lösung für ein Entscheidungsproblem zu finden, indem mehrere durch mathematische Funktionen ausgedrückte Ziele gleichzeitig verfolgt werden. Im Gegensatz zu MADM sind dabei die zur Verfügung stehenden Alternativen nicht explizit vorgegeben, sondern werden aus einer theoretisch unendlich großen Menge innerhalb eines kontinuierlichen Lösungsraums unter Berücksichtigung der Zielfunktionen und definierter Constraints berechnet.

---

<sup>3</sup> Neben der hier verwendeten Software IDRISI verfügt nach Jankowski mindestens eine weitere GIS-Software, CommonGIS, über eine vollständige Integration von MCDM-Funktionalitäten (vgl. Jankowski, 2006, S. 293). Bei verschiedenen weiteren der geläufigeren GI-Software-Pakete (ArcGIS, Geomedia, MapInfo) existiert eine derartige vollständige Integration nach Kenntnis des Autors der vorliegenden Arbeit jedoch gegenwärtig nicht. In diesen Fällen besteht somit die Notwendigkeit ggf. extern bereitgestellte Funktionalitäten je nach Möglichkeit mehr oder weniger eng einzubinden.

Durch die gleichzeitig Verfolgung mehrerer Ziele und das Erfordernis für alle eine optimale Lösung herbeizuführen ist die Dimension des Entscheidungsproblems innerhalb des MODM gegenüber dem eines MADM erhöht (vgl. Herzig, 2007, S. 72).

Während MADM somit insgesamt als Selektions-Prozess angesehen werden kann, in dem auf Basis bekannter Beurteilungskriterien die beste Alternative aus einer diskret formulierten Menge identifiziert bzw. ausgewählt wird, ist mit MODM ein innerhalb eines kontinuierlichen Entscheidungsraums stattfindender Design-Prozess verbunden, durch den die beste Alternative unter Berücksichtigung aller Zielfunktionen berechnet wird (Ermittlung des Pareto-Optimums, vgl. Jankowski, 1995, S. 254).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit bildet die Ermittlung von aus Umweltsicht geeigneten Standorten zur Errichtung von Wohnbebauung das in praktischer Hinsicht übergeordnete Ziel. Die einzelnen Alternativen sind dabei unter Berücksichtigung verschiedener umweltspezifischer Beurteilungskriterien zu bewerten. Angesichts eines derartigen Entscheidungsproblems wurde für die vorliegende Arbeit der Ansatz des Multiattribute Decision Making als relevanter erachtet als der des Multiobjective Decision Making.<sup>4</sup>

Entsprechend werden Methoden aus dem Bereich des MODM im Weiteren nicht eingehender betrachtet. Eine inhaltliche Einführung in verschiedene multiobjektive Entscheidungsregeln findet sich bei Figueira/Greco/Ehrgott (vgl. vor allem Ehrgott/Wiecek, 2005 / Nicke/Puerto/Rodriguez-Chia, 2005) sowie Malczewski (vgl. Malczewski, 1999, S. 237 ff.) Letzterer bietet zudem eine Übersicht über zahlreiche unterschiedliche MODM-Methoden nutzende Arbeiten (Malczewski, 2006b, S. 711 f.).

Auch innerhalb des MADM lassen sich verschiedene Ansätze identifizieren, in denen sich dem grundsätzlichen Ziel, die jeweils relevanten Informationen in einer umfassenden Entscheidungsgrundlage zusammenzuführen, auf unterschiedliche Weise genähert wird (vgl. für einen einführenden Überblick Malczewski, 1999, S. 198 ff. / Schwarzv.Raumer, 1999, S. 41 ff. / Jankowski, 1995, S. 257 ff. / Chakhar/Martel, 2003, S. 64).

---

<sup>4</sup> Im Gegensatz hierzu wäre im Hinblick auf die Stadtplanung beispielsweise die gleichzeitige optimale Verortung mehrerer miteinander in Konflikt stehender Landnutzungsformen, wie z. B. von Wohngebieten, Industriegebieten und Erholungsparks, als Entscheidungsproblem anzusehen, für das eine Lösung unter Nutzung von Methoden des MODM herbeizuführen wäre. Auch wenn es sich dabei prinzipiell um eine mindestens ebenso spannende Frage handelt, soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Beschränkung auf das Themenfeld „Wohnnutzung“ erfolgen.

Unter Berücksichtigung von publizierten Arbeiten aus dem Schnittbereich von GIS und MCDM stellen die Ideal-Point-Methode, Outranking-Methoden sowie der, an späterer Stelle zu behandelnde, Analytical Hierarchy Process (AHP) mehr oder weniger stark verbreitete Ansätze zur Aggregation multipler Kriterien dar (vgl. Malczewski, 2006b, S. 710f.).<sup>5</sup>

Bei der Ideal-Point-Methode erfolgt die Bewertung von Alternativen über ein der Anzahl der einbezogenen Entscheidungskriterien entsprechendes mehrdimensionales Distanzmaß. Die Beurteilung der Alternativen richtet sich dabei nach der Entfernung zu bestimmten als best- bzw. schlechtestmöglich definierten Referenzwerten.

Outranking-Methoden arbeiten demgegenüber mit jeweils kriterienspezifischen Paarvergleichen der zu betrachtenden Alternativen, um zu ermitteln, ob eine Alternative von einer anderen dominiert wird und somit aus den weiteren Analysen ausgeschlossen werden kann. Im Gegensatz zur Ideal-Point-Methode bzw. zu den im Weiteren zu behandelnden additiven Verfahren werden Alternativen somit nicht eigenständig bewertet, sondern grundsätzlich nur im gegenseitigen Vergleich (vgl. Harth, 2006, S. 70).

Angesichts der vorliegenden Fragestellung und der großen Menge an zu betrachtenden Alternativen wird eine Anwendung der Outranking-Methoden als weniger geeignet eingestuft. Zudem wird als nachteilhaft angesehen, dass lediglich in eingeschränktem Maße eine Möglichkeit zur Kompensation zwischen unterschiedlichen Bewertungskriterien besteht (vgl. Harth, 2006, S. 69).

Zusätzlich sei angeführt, dass die Umsetzung der beiden angeführten Lösungsansätze in beispielhaft untersuchten Artikeln jeweils mit speziellen Softwareprodukten erfolgte, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zur Anwendung gebracht werden konnten (vgl. zur Ideal-Point-Methode Jankowski/Andrienko/Andrienko, 2001, S. 109 ff. / zur ELECTRE-Methode Joerin/Theriault/Musy, 2001, S. 163 ff.). Weitere Arbeiten zu den angeführten Ansätzen stellt Malczewski zusammen (vgl. Malczewski, 2006b, S. 711). Auch wenn eine solche Einschränkung aus methodischer Sicht kein Hindernis darstellen darf, lässt sich ein solches in der Praxis jedoch nicht immer vermeiden.

Insgesamt werden somit die bislang angeführten MADM-Ansätze aus den weiteren Ausführungen ausgeschlossen. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass eine relativ aktuelle Einführung in verschiedene Outranking-Methoden, sowie ELECTRE- und PRO-

---

<sup>5</sup> An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass andere Autoren die Gesamtheit der multikriteriellen Entscheidungsverfahren nicht zwingend in die hier u. a. in Anlehnung an Malczewski genutzte Differenzierung einteilen. Zwischen MODM und MADM wird z. T. mit den entscheidungstechnologischen Ansätzen eine dritte Gruppe verortet, in die vor allem die hier angeführten Outranking-Methoden fallen (vgl. Poschmann/Riebenstahl/Schmidt-Kallert, 1998, S. 78 ff. / Harth, 2006, S. 58 ff.).

METHEE-Methoden als deren bekannteste Vertreter, durch Figueira/Greco/Ehrgott geboten wird (vgl. Figueira/Mousseau/Roy, 2005 / Brans/Mareschal, 2005 / Martel, 2005). Ein erster Überblick über die Ideal-Point-Methode kann u. a. bei Malczewski gefunden werden (vgl. Malczewski, 1999, S. 223 ff.)

Die in der MCDM-GIS-Literatur weiteste Verbreitung besitzen Entscheidungsregeln, welche die entscheidungsrelevanten Informationen durch eine Verschneidung von Daten des Boolean-Formats oder eine gewichtete Addition kombinieren (vgl. Malczewski, 2006b, S. 710). Bei additiven Bewertungsverfahren werden im Allgemeinen zunächst die relevanten Beurteilungskriterien ermittelt, auf die zu bewertenden Alternativen bezogen, entsprechend ihrer relativen Bedeutung gewichtet und im Anschluss auf eine näher zu definierende Weise additiv zu einer umfassenden Kenngröße aggregiert. Die mit diesen Methoden verbundene hohe Attraktivität ist dabei u. a. auch auf die verhältnismäßig gute Möglichkeit zur Implementation in einer Standard-GIS-Umgebung zurückzuführen.

Vor dem dargelegten Hintergrund wird für die hier relevante Fragestellung die Anwendbarkeit dieser Methodenfamilie, insbesondere angesichts der folgenden Ausführungen, als hoch eingeschätzt und soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

Mit dem „Ordered Weighted Average“-Ansatz wird in der Literatur ein Konzept beschrieben, das die Methoden des Boolean-Overlays und der gewichteten Addition generalisierend zusammenführt. Die angeführten Methoden dienen dabei als Extrema eines Kontinuums, innerhalb dessen eine theoretisch unendlich große Anzahl an Entscheidungsregeln mit spezifischen Eigenschaften im Hinblick auf den Grad des Entscheidungsrisikos und der Substituierbarkeit der berücksichtigten Kriterien (Trade-Off) verortet ist (vgl. Yager, 1988 / Jiang/Eastman, 2000 / Malczewski, 1999, S. 233 ff.). Durch die Möglichkeit zur problemangepassten Auswahl der mit der Entscheidung verbundenen Risikobereitschaft und des erlaubten Trade-Off wird dieser Ansatz als besonders relevant für die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegende Problemstellung angesehen. Eine daraus resultierende weiterführende Recherche zeigte, dass im Hinblick auf die Umsetzung des OWA-Ansatzes in der Literatur verschiedene Herangehensweisen verfolgt werden.

Eastman bietet für die Software IDRISI, im vorliegenden Fall die Version IDRISI-Andes, eine Möglichkeit zur freien Bestimmung der durch den OWA-Ansatz angebotenen Entscheidungsregeln (vgl. Eastman, 2006a, S.129 ff. / Eastman, 2006b, S. 116 ff.).

Malczewski entwickelt demgegenüber einen „Parameterized-OWA-Approach“, der dem Entscheidungsträger durch die Einführung eines zentralen Parameters (Risikobereitschaft) die komplexe Auswahl der sich aus dem OWA-Ansatz ergebenden Entscheidungsregel erleichtert (vgl. Malczewski, 2006a / Malczewski, 2003).

Darüber hinaus wurden Methoden entwickelt, die Auswahl der OWA-basierten Entscheidungsregeln durch die Nutzung aus dem allgemeinen Sprachgebrauch abgeleiteter (linguistic) Fuzzy-Quantifier zu bestimmen. Die Umsetzung einer solchen Herangehensweise erfolgte für die Software ArcGIS (vgl. Boroushaki/Malczewski, 2008 / Malczewski, 2006c / Malczewski/Rinner, 2004 / Malczewski, 2002).

Vor allem die von Eastman angebotene Methodik wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommen, daneben wird aber zusätzlich auch eine zumindest theoretische Auseinandersetzung mit den von Malczewski entwickelten Konzepten erfolgen. Entsprechend kommt insbesondere den angeführten Literaturbeiträgen dieser beiden Autoren eine hohe Bedeutung für die Entwicklung dieses Teils des theoretischen Fundaments der vorliegenden Arbeit zu.

Bei dem im Vorfeld bereits angeführten Analytical Hierarchy Process handelt es sich um einen weiteren im Bereich des MADM weit verbreiteten Ansatz, der sich u. a. als nützliche Methode erwiesen hat, um die Methoden der gewichteten Addition auf eine unterschiedliche Zielebenen umfassende Problemstellung auszuweiten. Dies zusammen mit der Methode des paarweisen Vergleichs machen diese Herangehensweise auch für die dieser Arbeit zugrunde liegende Fragestellung interessant (vgl. Saaty, 1980 / Boroushaki/Malczewski, 2008 / Malczewski, 2006b, S. 711).

Da Methoden des AHP- und des OWA-Ansatzes zum Teil an unterschiedlichen Stellen innerhalb des Entscheidungsprozesses ansetzen, kann es je nach Fragestellung sinnvoll sein, bestimmte Elemente beider Ansätze miteinander zu verbinden. In verschiedenen Fallstudien wurde eine solche Kombination ausgewählter Methoden eingesetzt (vgl. u. a. Malczewski et al., 2003 / Jiang/Eastman, 2000). Exemplarisch sei vor allem eine im Jahr 2006 von Gorsevski/Jankowski/Gessler publizierte Arbeit angeführt, deren grundsätzliche Vorgehensweise zumindest in einigen Teilen geeignet erscheint, auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit sinnvoll genutzt werden zu können.

Zur Modellierung des durch Erdbeben bestehenden Gefahrenpotenzials innerhalb einer Region der USA wurden sechs verschiedene als relevant erachtete topographische Kriterien unter Anwendung der Methode des paarweisen Vergleichs gewichtet und nach Standardisierung mittels Fuzzy-Membership-Funktionen über Methoden des OWA-Ansatzes aggregiert.

Das besondere Potenzial der dem AHP-Ansatz entlehnten Methode des paarweisen Vergleichs liegt dabei in der verhältnismäßig einfachen Ableitung robuster Gewichte für heterogene Daten, das des OWA-Ansatzes in der Generierung unterschiedlicher Szenarien in Abhängigkeit von den unterstellten Annahmen hinsichtlich des Risikos und des Trade-Off zwischen den einbezogenen Kriterien. Zusätzlich zeigt die Studie das Potenzial von Fuzzy-Membership-Funktionen, durch die nicht nur die Idee der Unschärfe in die Datenmodellierung einbezogen werden kann, sondern auch die Möglichkeit besteht, die notwendige Standardisierung der einbezogenen Daten auf Basis spezifischer fachlicher Erfordernisse durchzuführen. Im Ergebnis kommen die Autoren zu dem Schluss, dass der gewählte Lösungsansatz aufgrund der geschilderten Vorteile und seiner hohen Flexibilität im Hinblick auf eine angemessene Modellierung der realweltlichen Bedingungen ein geeignetes Instrument darstellt, um im Rahmen der betrachteten Problemlage die Entscheidungsträger mit nutzbringenden Informationen zu unterstützen.

Die Anwendung von Methoden des AHP- und des OWA-Ansatzes auf das Thema der Landnutzungsplanung wird in einer weiteren sehr aktuellen Studie für eine Region im Norden Thailands betrieben (vgl. Shutidamrong/Lovett, 2008). Von besonderem Interesse ist in dieser Publikation neben der Gegenüberstellung unterschiedlicher unter Nutzung verschiedener OWA-Methoden generierter Szenarios vor allem das Ziel, verschiedene Stakeholder-Gruppen an den Planungen partizipieren zu lassen.

Mit diesem Themenbereich wird ein weiterer außerordentlich bedeutender Aspekt des MCDM angerissen, auf den abschließend kurz eingegangen werden soll. In zahlreichen (räumlichen) Entscheidungsproblemen kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Entscheidungsfindung durch einen einzelnen Entscheidungsträger beeinflusst wird. Vielfältige Interessensgruppen wirken stattdessen mit unterschiedlichen Wertvorstellungen, Interessen und Motivationen auf verschiedenen Ebenen mit unterschiedlichem Einfluss an den letztlich zu treffenden Entscheidungen mit. Der Bedeutung dieses Themenfeldes wird in der MCDM-Literatur durch den aus vielfältigen Strömungen bestehenden Bereich des Group Decision Making Rechnung getragen (vgl. u. a. Jan-

kowski/Nyerges, 2003 / Jankowski/Nyerges, 2001 / Carver, 1999). Eine Übersicht über eine breite Vielfalt an speziell im Hinblick auf gemeinschaftliche sowie partizipatorische Entscheidungsfindung relevanten Literaturbeiträgen bietet Malczewski (vgl. Malczewski, 2006d). Rinner stellt eine in diesem Zusammenhang interessante Übersicht über die Entwicklung der internetbasierten Möglichkeiten des Group Decision Making und eine nach der Implementierung der Systeme strukturierte Kategorisierung bereit (vgl. Rinner, 2003).

Auch im Rahmen einer ganzheitlichen Stadtplanung, von der mit der hier behandelten Thematik ein kleiner Ausschnitt betrachtet wird, muss nicht nur ein Ausgleich zwischen zahlreichen unterschiedlichen Fachplanungen hergestellt werden, zusätzlich müssen auch die Zielvorstellungen des demokratisch legitimierten politischen Beschlussorgans sowie in der Regel die Interessen verschiedener Stakeholder Berücksichtigung finden. Zudem besteht auch für die allgemeine Öffentlichkeit mindestens an bestimmten gesetzlich definierten Stellen formeller Planungsverfahren unmittelbar die Möglichkeit, aktiv an der Entscheidungsfindung teilzunehmen bzw. Stellung zu den jeweils vorliegenden Planungen zu nehmen.

Insgesamt muss folglich gerade im Bereich der Stadtplanung dem vielgestaltigen Themenfeld des „Group Decision Making“ eine außerordentlich große Bedeutung zugesprochen werden. Dennoch kann eine Behandlung im Rahmen dieser Arbeit aus Gründen des Zeitbudgets aber auch im Hinblick auf den Gesamtumfang nicht geleistet werden, so dass dieser Aspekt trotz der hiermit verbundenen erheblichen Vereinfachung aus den weiteren Betrachtungen weitgehend ausgeblendet wird.

Ziel dieses Kapitels war, einerseits einen Einblick in das weite in der Literatur diskutierte Themenfeld in Bezug auf die Verbindung von Methoden des MCDM und der GIS zu geben und andererseits auf den speziellen im Rahmen dieser Arbeit zu nutzenden Ansatz zur Lösung der zugrunde liegenden Fragestellung hinzuleiten. Eine Kombination unterschiedlicher Ansätze bzw. aus diesen entliehener Methoden wird auf Basis der erfolgten Literaturrecherche hierfür als sinnvoll einsetzbar bzw. zumindest näher prüfenswert angesehen. Von Interesse sind in dieser Hinsicht insbesondere der AHP-Ansatz, der OWA-Ansatz sowie Methoden der Fuzzy-Set-Theory. Im nächsten Kapitel werden verschiedene theoretische Grundlagen erarbeitet, die für eine Anwendung im weiteren Verlauf der Arbeit erforderlich sind.

Zuvor sei jedoch aus Vollständigkeitsgründen kurz angemerkt, dass aufgrund des breiten in der Arbeit zur Anwendung gekommenen umweltspezifischen Themenfelds zu diesem zweiten großen Schwerpunkt verwendeter Literatur an dieser Stelle kein umfangreicher Überblick gegeben wird. Stattdessen sei hierzu auf Kapitel 4.1 bzw. die entsprechenden Unterkapitel verwiesen. Prinzipiell war für die Erstellung der vorliegenden Arbeit jedoch zum einen allgemeine Fachliteratur zum Thema Umweltplanung von Relevanz, u. a. um die im Rahmen der Modellierung zu nutzenden Umweltthemen auszuwählen, zum anderen in Bezug auf die einzelnen Themen jeweils vertiefende Literatur um die entsprechenden fachlich erforderlichen Beurteilungsgrundlagen zu erarbeiten. Hierzu wurde zudem vielfach auf die auf Bundes- und Landesebene erlassenen jeweils geltenden Gesetze und Verordnungen zurückgegriffen sowie auf weitere von Ministerien oder Landesämtern erstellte Publikationen, aus denen zudem auch zum Teil sehr aktuelle Informationen zum hier relevanten Untersuchungsgebiet gewonnen werden konnten.

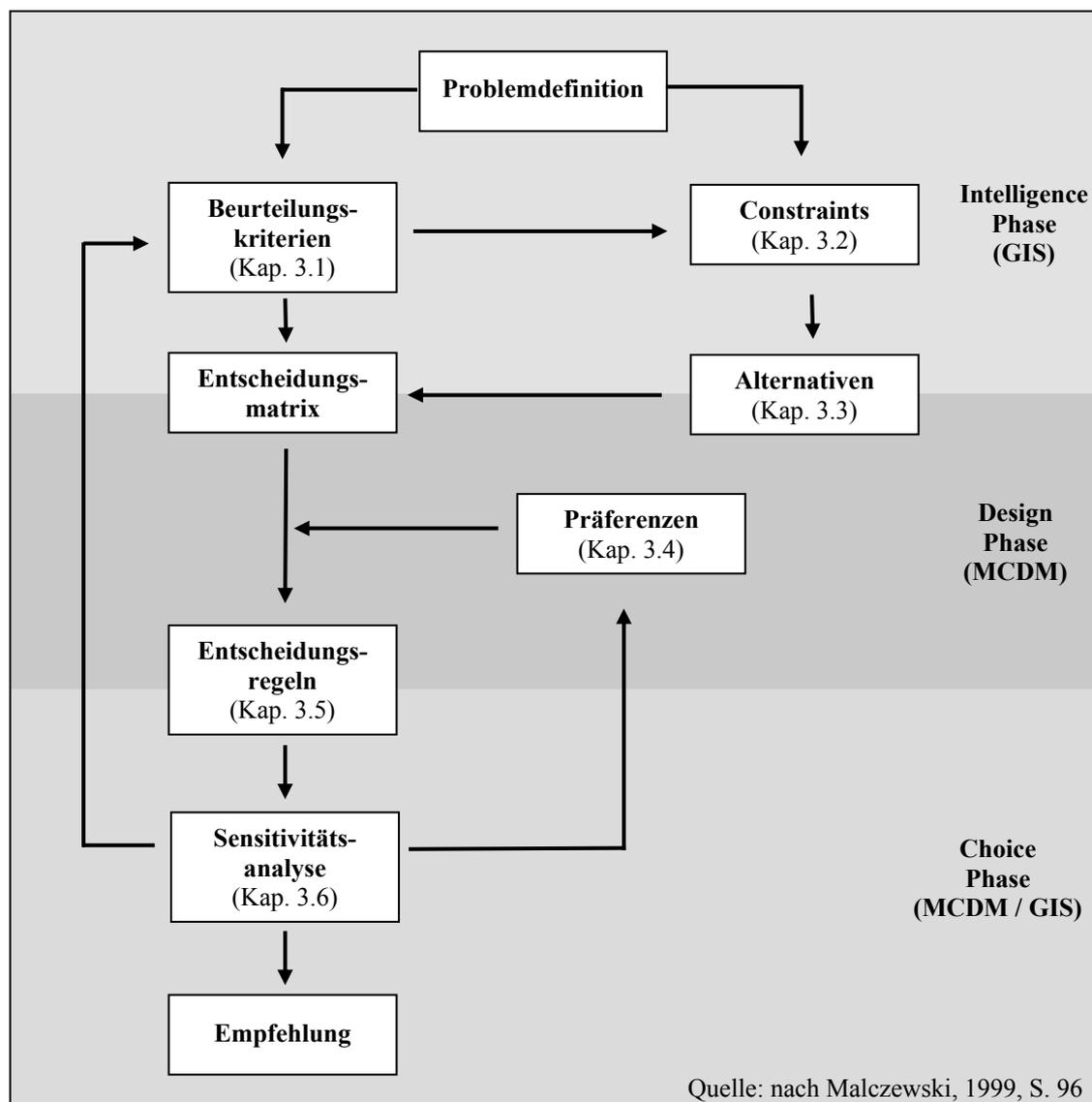
### 3. Theoretische Grundlagen

Bei der Auseinandersetzung mit einer im Rahmen der Stadtplanung vielfach vorliegenden vielschichtigen Entscheidungsproblematik kann der kombinierte Einsatz von Methoden aus dem Bereich der GIS und der MCDA möglicherweise ein hilfreiches Instrument darstellen, die erforderliche Entscheidungsfindung mit technischen Mitteln zu unterstützen. Nachdem im vorangegangenen Kapitel ein kurzer Einblick in das weite Themenfeld einer derartigen Verbindung gegeben und innerhalb dessen auf einen Ansatz hingeleitet wurde, der im Hinblick auf die dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellung als nutzbringend anwendbar angesehen wird, werden sich die folgenden Ausführungen mit in diesem Zusammenhang wesentlichen theoretischen Grundlagen befassen.

Als Entscheidung kann im Allgemeinen eine Situation angesehen werden, in der sich eine Person zwischen mehreren zur Verfügung stehenden Optionen präferentiell festlegt, somit also eine Alternative einer oder mehreren anderen vorzieht. Dabei kann als Entscheidung im engeren Sinne der Moment angesehen werden, in dem die Festlegung erfolgt. Im weiteren Sinne kann unter Entscheidung jedoch auch der gesamte Prozess verstanden werden, der sich von der Identifikation einer Wahlsituation bis zur abschließenden Festlegung auf eine Option erstreckt. Art und Umfang des kognitiven Aufwands können dabei je nach Entscheidungssituation prinzipiell mehr oder weniger stark ausgeprägt sein (vgl. Jungermann/Pfister/Fischer, 2005, S. 3, 31 ff. / Laux, 1998, S. 1, 8 ff.). In den folgenden Ausführungen wird unter Entscheidung der vollständige Prozess der Entscheidungsfindung verstanden. Abbildung 3-1 stellt einen möglichen Ablauf eines solchen Prozesses dar, der den weiteren Überlegungen zugrunde liegt und als Gliederung der folgenden Abschnitte dienen soll (vgl. Malczewski, 1999, S. 96 ff. / Janowski, 1995, S. 255 f. / Chakhar/Mousseau, 2008a, S. 748).<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Auch wenn den weiteren Ausführungen die gewählte modellhafte Abbildung eines Entscheidungsprozesses zugrunde gelegt wird, sei dennoch darauf hingewiesen, dass, ggf. differenziert nach der Problemsituation, auch andere Strukturierungen denkbar sein können, die sich mehr oder weniger stark von der hier genutzten unterscheiden (vgl. z. B. Grünig/Kühn, 2005, S. 61 ff.).



**Abb. 3-1: Modellhafter Ablauf eines multikriteriellen räumlichen Entscheidungsprozesses**

Am Anfang eines Entscheidungsprozesses steht demnach die Identifikation des Problems, für das eine Entscheidung herbeigeführt werden soll, bzw. eines grundsätzlich als Ergebnis der Entscheidung anzustrebenden Ziels. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist in dieser Hinsicht die aus Umweltsicht möglichst optimale Verortung von Wohngebieten in dem gewählten Untersuchungsgebiet anzuführen.

Da in Entscheidungen oftmals eine Vielzahl unterschiedlicher Belange mit zum Teil gleichgerichteten zum Teil gegenläufigen Zielsetzungen einfließt, gilt es im Anschluss an die Problemdefinition das zu untersuchende Problem eingehend zu analysieren, um ein umfassendes Bild der Entscheidungssituation zu erhalten.

Innerhalb der als „Intelligence Phase“ bezeichneten Stufe des Prozesses sind somit alle für eine sachgerechte Entscheidung wesentlichen Aspekte zu ermitteln. Für jeden dieser

entscheidungsrelevanten Belange sind darüber hinaus sowohl die jeweiligen Zielvorgaben zu definieren als auch entsprechende Maßstäbe, anhand derer der Grad der Zielerreichung für die einzelnen Alternativen beurteilt werden kann.

Neben den Beurteilungskriterien sind in dieser Prozessphase zusätzlich alle Restriktionskriterien aufzudecken, durch die bestimmte Alternativen einer potenziellen Betrachtung entzogen werden. Derartige Constraints dienen dazu, den Entscheidungsspielraum auf die prinzipiell realisierbaren Alternativen einzugrenzen.

Insgesamt fließen somit einerseits die verfügbaren Alternativen andererseits die zu deren Beurteilung zu nutzenden Kriterien in den weiteren Entscheidungsprozess ein. Bildlich dargestellt kann ein solches Vorgehen als Entscheidungsmatrix angesehen werden, in der die einzelnen Alternativen in den Zeilen, die Beurteilungskriterien in den Spalten aufgetragen werden, die jeweiligen Tabellenzellen folglich den spezifischen Beurteilungswert der entsprechenden Alternative beinhalten.

Mit den Präferenzen des Entscheidungsträgers wird ein weiterer für die Entscheidungsfindung wesentlicher Aspekt in das Entscheidungsmodell einbezogen. Auch wenn alle relevanten Belange in einer fundierten Entscheidung berücksichtigt werden müssen, nehmen diese für den Entscheidungsträger nicht zwingend die gleiche Bedeutung ein bzw. beeinflussen ihn in seiner Entscheidung gleich stark. Um der relativen Bedeutung der einzelnen Beurteilungskriterien Rechnung tragen zu können, werden diese mit spezifischen Gewichten versehen.

Die Bestimmung der Rangfolge der geeigneten Alternativen entsprechend der gewichteten Zusammenführung der aus den einzelnen Kriterien resultierenden Beurteilungen bzw. die Entscheidung, welche Alternative anderen unter Berücksichtigung der modellierten Bedingungen vorzuziehen ist, wird schließlich durch spezielle Entscheidungsregeln geleistet. Insbesondere die erhebliche Bedeutung dieser die Ergebnisse in hohem Maße beeinflussenden Regeln wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit einer näheren Betrachtung unterzogen.

Mit dem Schritt der Entscheidungsregeln wird gleichzeitig der Übergang von der als „Design Phase“ bezeichneten Stufe des Entscheidungsprozesses zur „Choice Phase“ vollzogen. Nachdem in der ersten Phase des Prozesses (Intelligence Phase) die Entscheidungssituation eingehend hinsichtlich der einzubeziehenden Belange untersucht wurde und die Design Phase geprägt war durch die modellhafte Abbildung dieser Situation, werden in der Choice Phase die einzelnen Alternativen entsprechend ihrer Eignung

(Suitability) zur Erreichung des Gesamtziels miteinander verglichen um hieraus letztlich eine abschließende Empfehlung abzuleiten (vgl. Malczewski, 1999, S. 75 ff.).

Bevor der Entscheidungsprozess jedoch mit einer derartigen Empfehlung für eine bestimmte Menge an Alternativen zu seinem Abschluss findet, dient die Sensitivitätsanalyse dazu, die Robustheit der Ergebnisse zu untersuchen. Sofern leichte Variationen der Prozessvariablen, wie der Beurteilungskriterien oder der Kriteriengewichte, die Rangfolge der Alternativen nicht signifikant beeinflussen, können die Ergebnisse als verhältnismäßig gesichert angesehen werden. Andernfalls sollten die gewonnen Erkenntnisse sorgfältig geprüft und ggf. eingesetzt werden, um die Modellierung angemessen zu überarbeiten. Eine intensive iterative Auseinandersetzung mit diesem Verfahrensschritt trägt somit durch die eingehendere Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen den Entscheidungselementen im Hinblick auf die erzeugten Ergebnisse zu einem tieferen Verständnis der Modellierung des Entscheidungsproblems bei.

Während im Hinblick auf die Kombination von GIS- und MCDA-Funktionalitäten vereinfachend dargestellt die spezifischen Stärken ersterer zunächst im Rahmen der Intelligence Phase genutzt werden können, um die räumlich ausgeprägten Beurteilungskriterien und Constraints in angemessener Weise aufzubereiten, sind letztere u. a. geeignet, die Modellierung der Entscheidungssituation insbesondere im Hinblick auf die Präferenzen der Entscheidungsträger zu betreiben. In der abschließenden Choice Phase lassen sich Methoden beider Themenfelder vielfach intensiv miteinander verbinden.

In den folgenden Abschnitten werden, orientiert an den für das weitere Vorgehen relevanten Gesichtspunkten, die einzelnen Elemente eines solchen Entscheidungsprozesses näher betrachtet.

#### **3.1 Beurteilungskriterien**

Wie eingangs dargestellt, sind die im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelten Entscheidungen abhängig von bestimmten Entscheidungskriterien, die zur Bewertung der in Frage kommenden Alternativen dienen.

Die Beurteilung richtet sich dabei nach bestimmten Zielen, die für jeweils einen in der Entscheidung zu berücksichtigenden Aspekt den angestrebten Zustand ausdrücken. Durch die Definition von mindestens einem als Attribut bezeichneten Indikator sind die einzelnen Ziele so zu operationalisieren, dass letztlich die Möglichkeit besteht, den Grad der Zielerreichung quantifiziert auszudrücken. Ziele und Attribute bilden dabei ein, je nach Entscheidungsproblem mehr oder weniger komplexes hierarchisches ggf. als Zielpyramide darstellbares System. An der Spitze steht dabei das nicht selten relativ abstrakte Ziel, für das eine Entscheidung herbeizuführen ist. Jede Stufe der Pyramide trägt im Weiteren dazu bei, das Ziel bzw. dessen Unterziele zunehmend präziser zu formulieren. Unabhängig von der Anzahl der Stufen und der Komplexität des Gesamtsystems stehen an dessen Basis grundsätzlich immer konkrete messbare Attribute, die räumlich dargestellt als Kartenlayer die Eingangsdaten für die multikriterielle Entscheidungsfindung bilden.

##### **3.1.1 Ermittlung der Beurteilungskriterien**

Eine der zentralen Aufgaben besteht somit zu Beginn darin, die für eine fundierte und sachgerechte Entscheidung erforderlichen Beurteilungskriterien, in Form von miteinander in Beziehung stehenden Zielen und Attributen, zu bestimmen. Dabei sind die Kriterien so zu wählen, dass eine angemessene Modellierung der speziellen Entscheidungssituation gewährleistet wird. In gewissem Maße ungeachtet des speziellen Problems sind hierzu bei der Ermittlung der Kriterien bestimmte Regeln zu beachten (vgl. Malczewski, 1999, S. 107 ff.).

Jedes einzelne Attribut sollte demnach messbar sowie geeignet sein, dem Entscheidungsträger eine eindeutige und unmissverständliche Information über den Grad der entsprechenden Zielerreichung zu liefern.

Gleichzeitig sollte das Kriterienset so gestaltet werden, dass nicht nur alle relevanten Aspekte in das Entscheidungsmodell einbezogen werden, alle für die Entscheidung erforderlichen Informationen folglich Berücksichtigung finden können, sondern sich dem Entscheidungsträger auch die Bedeutsamkeit der Kriterien und somit die mit einer Alternativenwahl verbundenen Konsequenzen erschließen.

Um eine unsachgemäße Entscheidungsverzerrung durch einen ggf. versteckten mehrfachen Einbezug eines Aspekts zu vermeiden, sollten die Attribute darüber hinaus möglichst weitgehend unabhängig voneinander sein.

Zudem sollte, um eine angemessene Modellierung der Entscheidungssituation zu gewährleisten, die Anzahl der einbezogenen Kriterien sorgfältig geprüft werden. Eine zu starke Vereinfachung der Problemstellung schränkt die Möglichkeit zur verantwortungsvollen Unterstützung einer fundierten Entscheidung unter Umständen übermäßig ein. Andererseits kann eine alle Details des Entscheidungsprozesses berücksichtigende Kriterienmenge bei der Ermittlung, Aufbereitung und Auswertung der Daten einen erheblichen Arbeitsaufwand bedeuten, ohne dass die Ergebnisse zwingend positiv beeinflusst werden müssen. Insgesamt sollte das Kriterienset unter Beachtung einer problem-spezifisch angemessenen Modellierung einen hinsichtlich der Arbeitseffizienz möglichst geringen Umfang aufweisen.

Die thematische Ermittlung der für eine Entscheidungssituation relevanten Kriterien kann sich grundsätzlich auf verschiedene Techniken stützen, zu denen neben der Prüfung einschlägiger Literatur auch die Befragung von mit der Problemstellung in Beziehung stehenden Personen zählt. Zusätzlich sollte in jedem Fall eine iterative Auseinandersetzung mit der Modellierung der Entscheidungssituation erfolgen, in der über eine intensive Analyse der Auswirkungen der Eingangsvariablen auf die Ergebnisse, ein vertieftes Verständnis der Problemstellung erzeugt wird. Auf diese Weise können ggf. Rückschlüsse auf die Notwendigkeit gezogen werden, bestimmte Kriterien zu streichen, zusätzliche hinzuzufügen oder bestehende zusammenzufassen um die Qualität der Modellierung zu erhöhen (vgl. auch Kap. 3.6) (vgl. Malczewski, 1999, S. 109 ff.).

#### **3.1.2 Aufbereitung der Kriterienkarten**

Für jedes der ermittelten Attribute wird ein Kartenlayer (Factor Map) erstellt, durch den jeder Alternative innerhalb des Untersuchungsgebiets ein Wert zugewiesen wird, der die Möglichkeit zur Beurteilung im Hinblick auf die jeweilige Zielsetzung bietet.

Factor Maps sind dabei in der Regel das Ergebnis einer vorangegangenen im Hinblick auf das jeweils zu beurteilende Ziel durchgeführten Datenanalyse und Datenmodellierung und dienen im Weiteren als Eingangsdaten für die multikriterielle Entscheidungsfindung (vgl. Malczewski, 1999, S. 112, 135 f. / Eastman, 2006a, S. 124).

Bevor allerdings die oftmals auf unterschiedlichen Maßeinheiten basierenden kriterien-spezifischen Kartenlayer miteinander in Beziehung gesetzt werden können, muss zu-

nächst die Möglichkeit der Vergleichbarkeit hergestellt werden, d. h. die Kriterienkarten müssen standardisiert werden (vgl. Malczewski, 1999, S. 112 ff. / Eastman, 2006a, S. 130 / Kaule, 2002, S. 276 f. / Schwarz-vonRaumer, 1999, S. 49 f.).

Unter Berücksichtigung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellung kann eine Standardisierung im inhaltlichen Sinne die Generierung kriterienspezifischer Eignungskarten (Suitability Maps) bedeuten. Dabei wird für jedes relevante Entscheidungskriterium eine Karte erzeugt, die unter Berücksichtigung der speziellen Kriterienziele eine Aussage über die Eignung jeder Alternative für die anvisierte Wohnnutzung bietet.

Für eine Standardisierung steht prinzipiell eine Vielzahl unterschiedlicher Vorgehensweisen zur Verfügung (vgl. Malczewski, 1999, S. 116 ff.). Häufig genutzte Techniken bilden lineare Transformationen wie die folgenden beiden Gleichungen:

$$x'_{ij} = x_{ij} / \max x_j \quad \text{[Formel 1]}$$

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \quad \text{[Formel 2]}$$

wobei  $x'_{ij}$  den standardisierten Wert des Attributs  $j$  für die Alternative  $i$ ,  $x_{ij}$  den ursprünglichen Wert dieses Attributs für diese Alternative und  $\max x_j$  bzw.  $\min x_j$  die jeweils maximale bzw. minimale Ausprägung des Attributs  $j$  darstellen.

Als Ergebnis beider Transformationen entstehen standardisierte Werte, die in einem Wertebereich von 0 bis 1 liegen. Als nachteilhaft bei der Anwendung der ersten Formel kann jedoch angesehen werden, dass für den maximalen Attributwert zwar grundsätzlich die maximale standardisierte Ausprägung von 1 erreicht, das standardisierte Minimum von 0 allerdings nicht zwingend berechnet wird. Bei Anwendung der zweiten Formel bewegen sich die standardisierten Werteausprägungen demgegenüber exakt in dem Wertebereich von 0 bis 1, wobei der kleinste Attributwert mit 0 standardisiert wird, der größte Attributwert mit 1.

An dieser Eigenschaft lässt sich unmittelbar ein nennenswerter Kritikpunkt dieser Methoden erkennen. Durch die Orientierung der standardisierten Werte an den minimalen und maximalen Ausprägungen der Ursprungsdaten werden diese in hohem Maße durch auftretende Extremwerte beeinflusst. Insbesondere in Situationen, in denen die Ursprungswerte mit einer gewissen Unsicherheit verbunden sind, kann eine solche Vorgehensweise zu unerwünschten Auswirkungen hinsichtlich der Aussagefähigkeit der berechneten standardisierten Werte führen.

Zudem besteht auf diese Weise nicht die Möglichkeit, im Rahmen der Standardisierung unmittelbar für die Entscheidungssituation relevante Anforderungen zu berücksichtigen.

Eine von dieser Vorgehensweise abweichende Art der Standardisierung besteht in der ausdrücklichen Beeinflussung der Transformationsfunktion im Hinblick auf zentrale (kritische) Punkte. Im Gegensatz zu einer sich ausschließlich aus den Ursprungsdaten ergebenden und somit auf endogene Faktoren zurückzuführenden Berechnung der standardisierten Werte, kann deren Ausprägung bei einer direkten Beeinflussung der Transformationsfunktion unter Berücksichtigung exogener Faktoren gezielt gesteuert werden. Auf diese Weise können die kritischen Werte beispielsweise auf Basis technischer oder rechtlicher Vorgaben zielorientiert unmittelbar festgesetzt werden (vgl. Hocevar/Riedl, 2003, S. 300 f.).

Zur Verdeutlichung der für die vorliegende Arbeit außerordentlich bedeutenden Thematik sei an dieser Stelle ein kurzes Beispiel angeführt. Die Eignung eines Gebietes zur Realisierung einer Wohnbebauung kann u. a. durch die Existenz eines Emissionen verursachenden Betriebes eingeschränkt werden, wobei die Belastungen mit zunehmender Entfernung von diesem Betrieb abnehmen, die Eignung des Gebiets für die anvisierte Wohnnutzung in dieser Hinsicht somit steigt. Bei einer Standardisierung entsprechend der angeführten linearen Transformation würde auf einer die Distanz zum Emittenten darstellenden Karte, der Punkt mit der größten Entfernung (z. B. 10 km) den standardisierten Wert 1 (maximale Eignung) erhalten, der Punkt mit der geringsten Entfernung den Wert 0 (minimale Eignung). Unberücksichtigt bleibt dabei u. a., dass ein Bereich in 5 km Entfernung ggf. ebenso wenig durch die Emissionen belastet wird, wie der in maximaler Entfernung. Gleichfalls wäre denkbar, dass auch der Bereich in 10 km Entfernung noch durch die Emissionen beeinflusst wird, eine Eignung somit nicht gewährleistet ist.

Vor diesem Hintergrund besteht in vielen (nicht notwendigerweise allen) Anwendungszusammenhängen das zwingende Erfordernis zu einer Modellierung von Eignungskarten auf Basis der für das jeweils betrachtete Entscheidungskriterium relevanten externen Vorgaben. Für den hier betrachteten emittierenden Betrieb kann beispielsweise aufgrund anerkannter externer Vorgaben davon ausgegangen werden, dass ab einer Entfernung von 500 Metern keine Beeinträchtigung mehr zu erwarten ist. Die Eignung für Wohnnutzung kann somit ab dieser Entfernung als uneingeschränkt, d. h. maximal, angesehen werden. Umgekehrt könnte bis zu einer Entfernung von beispielsweise 50 Me-

tern eine unzumutbare gesundheitsgefährdende Beeinträchtigung vorliegen, so dass, unabhängig von der exakten Distanz, alle Bereiche unterhalb dieser Schwelle eine Eignung von 0 erhalten. Zwischen den auf diese Weise modellierten Werten verändert sich der standardisierte Eignungswert entsprechend der genutzten mathematischen Transformationsfunktion kontinuierlich, ein Bereich in einer Entfernung von 499 Metern wird somit als nur unwesentlich weniger geeignet angesehen als einer in 500 Metern Entfernung.

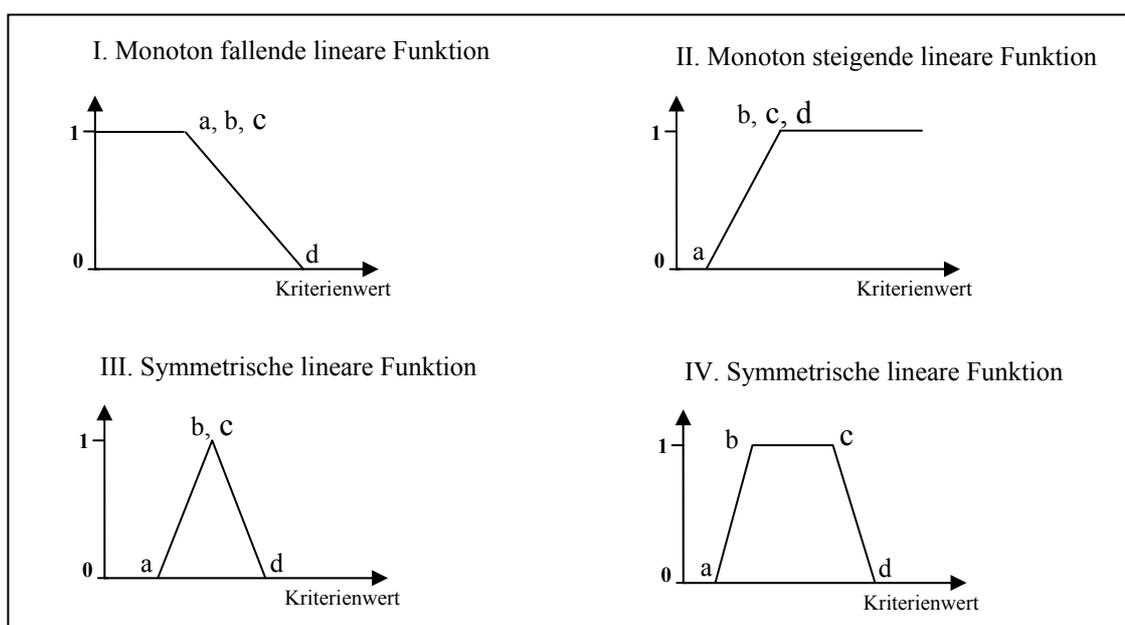
Eine derartige Eignungskarte stellt die Daten als Fuzzy Set dar, indem statt einer scharfen Grenze ein mehr oder weniger schnell stattfindender Übergang zwischen der Zugehörigkeit zu den Beurteilungskategorien „geeignet“ (1) und „nicht-geeignet“ (0) besteht. Ein solches Vorgehen unterscheidet sich deutlich von der auf eindeutigen Grenzen basierenden klassischen Datendarstellung als „Crisp-Set“, wobei letztere als Spezialfall eines Fuzzy Sets angesehen werden kann, in dem die Zugehörigkeit (Fuzzy-Membership) abrupt von Eignung zu Nicht-Eignung wechselt. Durch die Fuzzy-Set-Theorie wird somit die klassische zweiwertige Boolean-Logik durch den Einbezug von Unschärfe erweitert (vgl. Eastman, 2006a, S. 130, 163 / Malczewski, 1999, S. 130 / Blaschke, 1997, S. 38 / Zadeh, 1965).

Verschiedene Möglichkeiten einer solchen Standardisierung auf Basis unterschiedlicher mathematischer Funktionen (Zugehörigkeitsfunktion bzw. Fuzzy-Membership-Function) beschreibt beispielsweise Eastman, eine entsprechende Umsetzung erfolgte in der Software IDRISI-Andes (vgl. Eastman, 2006a, S. 164 f. / vgl. auch Gorsevski/Jankowski/Gessler, 2006, S. 123 ff.). Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorwiegend diese Software genutzt wird, beziehen sich die weiteren Ausführungen vor allem auf die dort bereitgestellten Funktionen. Für eine alternative Herangehensweise zur Bestimmung der Fuzzy-Membership-Functions sei beispielhaft auf den Ansatz der MapModels verwiesen (vgl. Benedikt/Reinberg/Riedl, 2002, S. 153 ff. / Hocevar/Riedl, 2003, S. 299 ff.)

Im einfachsten Fall erfolgt eine Standardisierung wie beschrieben über lineare Funktionen. Verschiedene Ausgestaltungen einer solchen linearen Funktion sind je nach den speziellen kriterienspezifischen Anforderungen sinnvoll und können durch die Festlegung kritischer Werte (in IDRISI die Wendepunkte a, b, c und d) entsprechend bestimmt werden (vgl. Abb. 3-2).

### 3. Theoretische Grundlagen

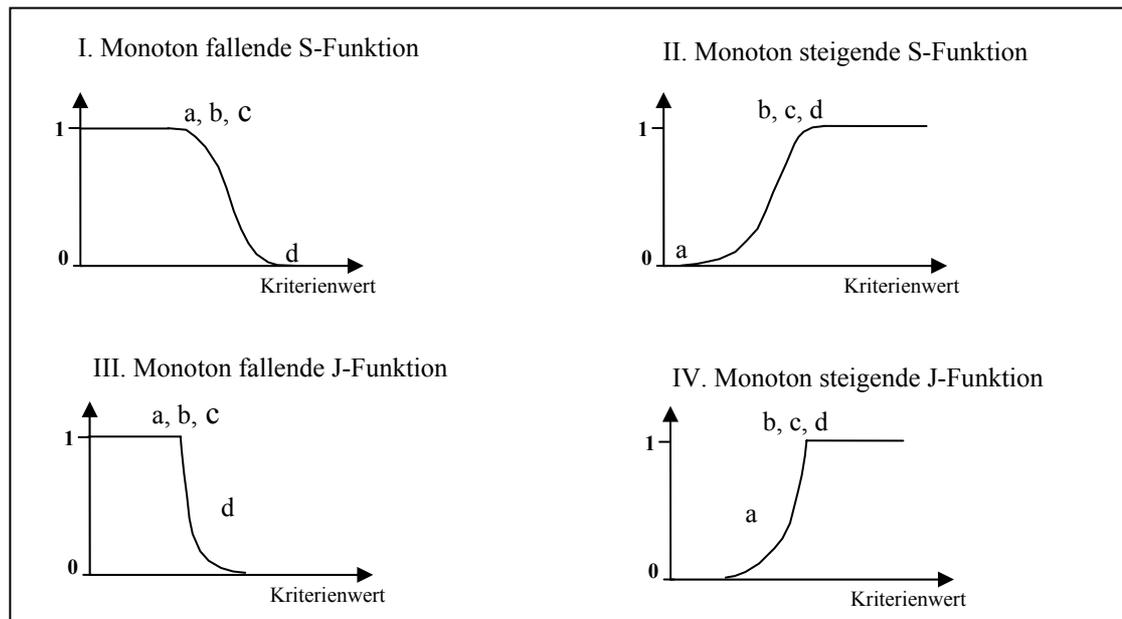
In IDRISI kann durch den Wendepunkt a der Kriterienwert definiert werden, an dem die Fuzzy-Membership-Funktion über den Wert 0 steigt und durch den Wendepunkt d der Kriterienwert, an dem dieser Wert wieder erreicht wird. Die Wendepunkte c und d können demgegenüber die Kriterienwerte bestimmen, an denen die Zugehörigkeitsfunktion den Wert 1 erreicht bzw. wieder verlässt (vgl. Abb. 3-2 IV). Unterschiedliche Ausgestaltungen der Zugehörigkeitsfunktion können dadurch entstehen, dass für die Wendepunkte identische Kriterienwerte vergeben werden (vgl. Abb. 3-2 I, II, III).



**Abb. 3-2: Lineare Fuzzy Membership Funktionen**

**(Quelle: nach Eastman, 2006a)**

Neben den linearen Funktionen besitzen vor allem die S-förmigen (sigmoidalen) Funktionen im Rahmen der Fuzzy-Set-Theorie eine besondere Bedeutung. Im oberen Teil der Abbildung 3-3 werden beispielhaft eine monoton fallende und eine monoton steigende S-Funktion dargestellt. Andere Ausgestaltungen, analog zur Abb. 3-2 u. a. unterschiedliche Arten symmetrischer Funktionen, können je nach konkretem Erfordernis durch die Beeinflussung der Wendepunkte generiert werden.



**Abb. 3-3: Fuzzy Membership S- und J-Funktionen (Quelle: nach Eastman, 2006a)**

Im unteren Teil der Abbildung 3-3 wird mit den J-Funktionen eine dritte im Rahmen der Fuzzy-Set-Theorie bedeutende Funktionsart dargestellt. Im Unterschied zu den S-Funktionen nähert sich bei den J-Funktionen der Wert einer auf diese Weise modellierten Eignungskarte dem Wert 0 zwar an, erreicht ihn aber nur im Unendlichen. Die Zugehörigkeit zur Beurteilungskategorie „ungeeignet“ wird somit niemals (vollständig) erreicht. Die Wendepunkte a und/oder d repräsentieren entsprechend den Kriterienwert, für den die Eignungskarte einen Wert von 0,5 annimmt.

Auf die mathematische Umsetzung der dargestellten Funktionen in der Software IDRISI soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Hierzu sei auf die Ausführungen von Eastman verwiesen (vgl. Eastman, 2006a, S. 164 f. sowie die IDRISI-Online-Hilfe).

Insgesamt wird der in diesem Kapitel behandelte Abschnitt des Entscheidungsprozesses geprägt durch die Ermittlung und Aufbereitung der als bedeutend angesehenen Beurteilungskriterien.

Nachdem die entscheidungsrelevanten Kriterien zusammengestellt wurden, sind die mit diesen in Verbindung stehenden Daten vor dem Hintergrund der jeweiligen Zielsetzungen so zu modellieren, dass für alle Bereiche des zu betrachtenden Gebiets Aussagen über den Grad der entsprechenden Zielerreichung abgeleitet werden können. Durch die Auswahl und konkrete Beeinflussung einer Transformationsfunktion kann, ggf. unter Berücksichtigung zielgerichteter exogener kriterienspezifischer Vorgaben, eine Stan-

dardisierung gesteuert und somit eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Datengrundlagen in technischer und inhaltlicher Hinsicht hergestellt werden. Im Hinblick auf die Themenstellung der vorliegenden Arbeit bedeutet dies die Generierung kriterienspezifischer Eignungskarten.

#### **3.2 Constraints**

Ähnlich wie die im letzten Abschnitt besprochenen Beurteilungskriterien können auch Constraints als Kriterien angesehen werden, die unter Berücksichtigung spezieller Ziele einer Bewertung von Alternativen dienen. Im Gegensatz zu den zuvor behandelten Beurteilungskriterien, die den Grad der Zielerreichung messen und im weiteren Prozess dazu beitragen die Handlungsempfehlungen zielgerichtet zu steuern, werden durch Constraints bestimmte Alternativen aufgrund spezieller Eigenschaften jedoch aus der verfügbaren Menge aussortiert und somit einer späteren Auswahlmöglichkeit entzogen. Derartige den Entscheidungs(spiel)raum auf die prinzipiell realisierbaren Alternativen eingrenzende Beschränkungen können dabei auf unterschiedliche Ursachen zurückgehen. Sowohl natürliche als auch anthropogen erzeugte Umstände, wie beispielsweise normative Regulierungen, können dazu führen, bestimmte Alternativen als nicht realisierbar zu beurteilen und somit aus den weiteren Betrachtungen auszublenden (vgl. Malczewski, 1999, S. 147 f. / Chakhar/Mousseau, 2008a, S. 749).

Im Hinblick auf die Datenmodellierung können solche einschränkende Kriterien in vielen Fällen als Karten mit binärer Werteausprägung dargestellt werden (Constraint Maps). Sie entsprechen somit im Gegensatz zu den im letzten Abschnitt behandelten Fuzzy-Sets einer Modellierung als Crisp-Set. Bereiche, die vor dem Hintergrund der berücksichtigten Constraints aus den weiteren Betrachtungen auszuschließen sind, werden mit dem Wert 0 belegt, alle anderen mit dem Wert 1.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden lediglich die Alternativen in den Entscheidungsprozess einfließen, für die keines der als Constraint definierten Kriterien erfüllt ist. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass auch in diesem Zusammenhang die verschiedenen Kartenlayer grundsätzlich auf unterschiedliche Weisen zusammengeführt werden könnten. Die hier genutzte disjunktive Form der Aggregation ist somit nur eine von mehreren prinzipiell realisierbaren Möglichkeiten (vgl. Kap. 3.5.2 / Malczewski, 1999, S. 148 ff./ Chakhar/Mousseau, 2008a, S. 749).

Neben dieser dargestellten Form der Constraints sind auch andere einschränkende Faktoren denkbar, die nicht zu Beginn des Entscheidungsprozesses, sondern an dessen Ende das Set der relevanten Alternativen begrenzen, indem diese bestimmte Charakteristiken aufweisen müssen. Orientiert an der hier relevanten Fragestellung könnte in dieser Hinsicht beispielhaft die Einschränkung angeführt werden, dass nur Alternativen in einer abschließenden Empfehlung Berücksichtigung finden sollen, deren unmittelbar zusammenhängende Gesamtfläche eine bestimmte Mindestgröße aufweisen (vgl. Eastman, 2006a, S. 124 f. / Malczewski, 1999, S. 147 f.).

#### **3.3 Alternativen**

Als Alternativen werden hier die in dem Entscheidungsprozess zu betrachtenden veräumlichten Einheiten bezeichnet, für die sich ein Entscheidungsträger aussprechen kann. Dabei bedingt die Idee der Entscheidungsfindung, dass mindestens zwei alternative Handlungsmöglichkeiten zur Auswahl zur Verfügung stehen (vgl. Jungermann/Pfister/Fischer, 2005, S. 3).

Bei einer rasterbasierten Datenmodellierung ist jede Rasterzelle zunächst als eigenständige Alternative anzusehen. Durch die Wertezuweisungen der Factor Maps und Constraint Maps kann im Weiteren jede Rasterzelle hinsichtlich des Grads ihrer Eignung in Bezug auf die spezielle Zielsetzung beurteilt werden (vgl. Chakhar/Mousseau, 2008a, S. 749 / Jankowski, 1995, S. 264). Für eine abschließende Beurteilung muss allerdings zusätzlich die räumliche Auflösung in die Auswertung einbezogen werden. Je nach Fragestellung kann ggf. erst eine mehr oder weniger große Anzahl kombinierter Rasterzellen für eine Empfehlung genutzt werden.

Exemplarisch auf die vorliegende Arbeit bezogen bedeutet das, dass, angesichts einer zugrunde liegenden räumlichen Auflösung von 10 Metern, eine einzelne Rasterzelle, selbst bei optimaler Beurteilung hinsichtlich der einbezogenen Kriterien, kaum als geeignete Alternative für eine Wohnbebauung angesehen werden kann. Erst ab einer gewissen Mindestgröße wird eine Fläche als geeigneter Wohnstandort eingestuft werden können. Auf diese Form der Einschränkung ist bereits am Ende des letzten Abschnitts eingegangen worden (vgl. Kap. 3.2).

Da innerhalb der vorliegenden Arbeit ausschließlich Rasterdaten in die Analyse der multikriteriellen Entscheidungsfindung einbezogen werden, wird auf das Themenfeld

der Vektordaten an dieser Stelle nicht weiter eingegangen (vgl. hierzu u. a. Malczewski, 1999, S. 142 ff.).

#### **3.4 Präferenzen des Entscheidungsträgers**

In den bisher dargestellten Schritten des Entscheidungsprozesses wurden die Grundlagen gelegt, um ein angemessenes Modell der Entscheidungssituation zu konstruieren. Auf Basis der Analyse der Problemstellung wurden die für die Entscheidung relevanten Kriterien ermittelt und im Hinblick auf ihre Rolle innerhalb des Entscheidungsprozesses in unterschiedlichen Kriterienkarten (Factor Maps und Constraint Maps) modelliert. Während die Constraint Maps dazu dienen, die Gesamtmenge aller Alternativen auf die der Realisierbaren zu begrenzen, liefern die Factor Maps die Beurteilungskriterien, um für die verbleibenden Alternativen den Erfüllungsgrad der einzelnen in der Entscheidung zu berücksichtigenden Ziele zu quantifizieren.

Auch wenn in einer ausgewogenen Entscheidung letztlich alle relevanten Kriterien Berücksichtigung finden müssen, kann deren Bedeutung für den jeweiligen Entscheidungsträger unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Um diesem Aspekt angemessen Rechnung zu tragen, werden den einzelnen die Beurteilung beeinflussenden Kriterien, d. h. den jeweiligen Factor Maps, Gewichte zugewiesen, die deren relative Bedeutung zum Ausdruck bringen.

Zur Ermittlung der auf den Präferenzen des Entscheidungsträgers basierenden Gewichte wurden in der Literatur verschiedene Verfahren entwickelt (vgl. Malczewski, 1999, S. 177 ff. / Chakhar/Mousseau, 2008a, S. 750 / Turskis/Zavadskas/Zagorskas, 2006, S. 195 f.).

Bei der einfachsten Methodenfamilie, den Ranking-Methoden, werden die einzelnen Kriterien zunächst entsprechend der Präferenzen des Entscheidungsträgers in einer auf- oder absteigenden Reihenfolge angeordnet. Aus verschiedenen mathematischen Ansätzen (Rank Sum, Rank Reciprocal, Rank Exponent) heraus wurden Formeln entwickelt, um in Abhängigkeit von der Gesamtzahl der einbezogenen Kriterien sowie der Rankingposition des einzelnen Kriteriums die jeweiligen Gewichte zu bestimmen. Für alle Ansätze gilt, dass sie zwar relativ leicht zu nutzen sind, aufgrund ihrer mangelnden theoretischen Fundierung sowie ihrer eher geringen Präzision und Aussagekräftigkeit jedoch in vielen Zusammenhängen als wenig geeignet anzusehen sind. Da auf diese Me-

thoden in der vorliegenden Arbeit nicht zurückgegriffen werden soll, sei an dieser Stelle auf die angegebene Literatur verwiesen (vgl. Malczewski, 1999, S. 178 f., 190).

Mit den Rating-Methoden kann eine zweite in der Praxis relativ häufig genutzte Methodenfamilie angeführt werden, bei deren Anwendung der Entscheidungsträger die Gewichte entsprechend seiner Präferenzen einschätzt. Unter Nutzung des „Point Allocation“-Ansatzes wird eine vorgegebene Menge an Punkten (in der Regel 100 Punkte bzw. 1 Punkt) auf die einzelnen Kriterien verteilt. Je mehr Punkte ein Kriterium erhält, umso größer ist seine relative Bedeutung (vgl. Malczewski, 1999, S. 179 ff. / Eastman, 2006a, S. 130).

Bei dem aus der vorgenannten Methode abgeleiteten „Ratio-Estimation“-Ansatz wird dem bedeutendsten Kriterium ein Wert von 100 zugewiesen, während die folgenden Kriterien ein aus der Einschätzung des Entscheidungsträgers resultierendes proportional geringeres Gewicht erhalten. Im Anschluss wird das Verhältnis der Gewichte zueinander bestimmt sowie eine Normalisierung der Gewichte berechnet, so dass sich deren Werte zu 1 aufaddieren (vgl. Malczewski, 1999, S. 181 f.).

Insgesamt ermöglichen die Rating-Methoden somit bei einer überschaubaren Anzahl an Kriterien eine relativ leichte Festsetzung der Gewichte. Komplizierter wird die Zuweisung allerdings unter Berücksichtigung einer umfangreichen Kriterienmenge.

Als drittes Verfahren wird in der vorliegenden Arbeit die im Zusammenhang des „Analytic Hierarchy Process“ (AHP) genutzte Methode des paarweisen Vergleichs angeführt (vgl. Saaty, 1980, S. 17 ff. / Saaty, 2005, S. 348 ff.), der innerhalb der MCDA eine erhebliche Bedeutung zukommt (vgl. Malczewski, 1999, S. 187, 189 ff. / Eastman, 2006a, S. 131).

Unabhängig von der Gesamtzahl der in den Entscheidungsfindungsprozess einzubeziehenden Kriterien steht im Zentrum dieser Methodik immer der direkte Vergleich der relativen Bedeutung lediglich zweier Kriterien. Unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Zielsetzung wird das zu dessen Erreichung gewichtigere Kriterium entsprechend seiner relativen Bedeutung mit einem numerischen Wert von 2 bis 9, das andere Kriterium mit dessen reziprokem Wert belegt (vgl. Tab. 3-1).

**Tab. 3-1: Rating-Skala des paarweisen Vergleichs (Quelle: nach Eastman, 2006a, S. 131)**

Wert	1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Bedeutung	Extrem	Sehr stark	Stark	Moderrat		Moderrat	Stark	Sehr Stark	Extrem
	weniger ausgeprägt				gleich	stärker ausgeprägt			

Auch wenn aus Gründen der Übersichtlichkeit in Tab.3-1 nur die ungeraden Zahlenwerte aufgenommen wurden, können beim Vergleich zweier Kriterien prinzipiell auch die als Zwischenstufen anzusehenden geraden Wertausprägungen genutzt werden.

Insgesamt ergibt sich auf diese Weise eine Matrix, in der für alle Paarungen der sowohl zeilen- als auch spaltenweise abgebildeten Kriterien, die relative Bedeutung der Kriterien aufgezeigt wird.

Um auf dieser Grundlage die spezifischen Kriteriengewichte ermitteln zu können, sind zunächst die einzelnen Wertausprägungen so zu normalisieren, dass ihre Summe 1 ergibt. Hierzu werden die Einzelwerte durch die Summe der jeweiligen Spaltenwerte dividiert. Im Anschluss kann das relative Gewicht jedes Kriteriums näherungsweise<sup>7</sup> dadurch berechnet werden, dass in der auf diese Art erzeugten normalisierten Matrix zeilenweise die Durchschnittswerte bestimmt werden. Die Gewichte geben somit die durchschnittliche Einschätzung aller zu betrachtenden Vergleichsmöglichkeiten wieder. Durch die vorangegangene Normalisierung entspricht auch die Summe dieser Gewichte dem Wert 1.

Die Qualität der als Ergebnis ermittelten Gewichte ist dabei grundsätzlich in hohem Maße abhängig von der Verlässlichkeit der in der Matrix abgebildeten Einschätzungen der einzelnen relativen Bedeutungen. Im Idealfall sind die getroffenen Einstufungen auf theoretische oder empirische Kenntnisse zurückzuführen. Da aber selbst ohne derartige Informationen durch die Beschränkung auf lediglich paarweise Vergleiche die Unübersichtlichkeit sogar hochkomplexer Entscheidungssituationen erheblich reduziert wird, kann oftmals auch eine mehr oder weniger intuitive Einschätzung akzeptable Ergebnisse liefern.

<sup>7</sup> In der von Saaty entwickelten Vorgehensweise des AHP-Ansatzes werden die Gewichte über eine relativ komplexe Berechnungsmethode, den so genannten Principal Eigenvector (Eigenwertverfahren), abgeleitet (vgl. Saaty, 1980, S. 179 ff. / Saaty, 2005, S. 348 ff.). Bei der hier dargestellten Vorgehensweise handelt es sich um eine leicht nachvollziehbare Möglichkeit, die Gewichte mit einfachen Mitteln zu berechnen und dabei näherungsweise Ergebnisse zu erzielen, die das Eigenwertverfahren ergäbe (vgl. Eastman, 2006a, S. 132). Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch vor allem die Software IDRISI-Andes eingesetzt, in der die Möglichkeit umgesetzt wurde, den Principal Eigenvector unmittelbar zu berechnen.

Als zusätzlich wichtiger Schritt muss insbesondere vor diesem Hintergrund jedoch zwingend die Widerspruchslosigkeit der Einschätzungen überprüft werden. In der von Saaty entwickelten Methode wird hierzu ein aus den dargestellten Matrizen berechneter Konsistenz-Index (CI) mit einem solchen Index verglichen, der auf einer rein zufällig erstellten Matrix des paarweisen Vergleichs beruht (RI). Sofern das als „Consistency Ratio“ (CR) bezeichnete Verhältnis dieser beiden Indizes ( $CR = CI/RI$ ) geringer als 0,10 ist, kann die Konsistenz der getroffenen Einschätzungen als akzeptabel angesehen werden, andernfalls lässt das Ergebnis auf widersprüchliche Bewertungen innerhalb der verschiedenen Vergleiche schließen. In einem solchen Fall sollten die Einstufungen einer näheren Prüfung und darauf aufbauenden Überarbeitung unterzogen werden, um die Qualität und Verlässlichkeit der Aussagen zu erhöhen (vgl. Saaty, 1980, S. 21 / Malczewski, 1999, S. 184 ff. / Boroushaki/Malczewski, 2008, S. 400 ff.).

Wie zu Beginn dieses Abschnitts dargestellt, dienen die Gewichte grundsätzlich dazu, die relative Bedeutung eines Kriteriums bzw. des mit diesem in Verbindung stehenden Ziels im Rahmen der Entscheidungsfindung zu steuern. Wichtig ist dabei zu berücksichtigen, dass diese Gewichte in Abhängigkeit von dem Entscheidungsträger erheblich variieren können.

In den meisten Fällen werden räumliche Entscheidungsprobleme allerdings nicht durch einen einzelnen Entscheidungsträger bzw. eine Gruppe mit homogenen Präferenzen betrachtet, sondern durch verschiedene Interessengruppen, die den jeweiligen Entscheidungskriterien unterschiedliche Bedeutung beimessen. Sofern eine konsensuelle Festsetzung der Gewichte nicht zu erreichen ist, kann eine Möglichkeit dieser Situation Rechnung zu tragen in der Ermittlung der Präferenzen der einzelnen relevanten Parteien und deren Zusammenführung zu entsprechenden Gesamtgewichten bestehen, wobei wiederum der Art der Aggregation eine entscheidende Bedeutung zukommt (vgl. Malczewski, 1999, S. 87 f., 191 f., 222).

Auch wenn eine Ausblendung dieser Thematik, wie in Kap. 2 dargestellt, eine erhebliche Vereinfachung der Entscheidungssituation bedeutet, kann dieser Aspekt in dieser Arbeit nicht in der erforderlichen Weise weiter verfolgt werden.

#### **3.5 Entscheidungsregeln**

Mit den bislang behandelten Themenfeldern wurden wesentliche Elemente betrachtet, um eine Entscheidungssituation angemessen zu modellieren.

Die für eine Entscheidung relevanten Kriterien werden dabei genutzt, um die zur Verfügung stehenden Alternativen hinsichtlich ihrer Eigenschaft zu beurteilen, die unterschiedlichen in der Entscheidung zu berücksichtigenden Zielsetzungen entsprechend ihrer relativen Bedeutung für den Entscheidungsträger zu erfüllen.

Die Entscheidungsregeln dienen im Anschluss dazu, die verschiedenen auf diese Weise bereitgestellten Einzelinformationen zusammenzuführen und die Alternativen entsprechend ihrer Eignung im Hinblick auf die Erreichung des Gesamtziels zu beurteilen, um daraus eine Aussage über die insgesamt zu favorisierenden Alternativen ableiten zu können.

Für eine derartige Integration und umfassende Bewertung auf Basis aller Teilaspekte stehen prinzipiell zahlreiche Entscheidungsregeln zur Verfügung (vgl. Kap. 2). Einen tabellarischen Überblick hierzu sowie eine jeweils einführende Behandlung bietet u. a. Malczewski (vgl. Malczewski, 1999, S. 200 f. / vgl. auch Schwarz-v.Raumer, 1999, S. 41 ff.). Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird hinsichtlich der Ausführungen zu als wesentlich angesehenen theoretischen Grundlagen eine Beschränkung auf die in der vorliegenden Arbeit genutzten Aspekte erfolgen.

##### **3.5.1 Weighted Linear Combination (WLC)**

Eine weite Verbreitung im Bereich der räumlichen Entscheidungsfindung besitzt die als „Simple Additive Weighting“-Methode (SAW) bzw. „Weighted Linear Combination“-Methode (WLC) bezeichnete Entscheidungsregel.

Zur Ableitung einer alle Informationen einbeziehenden Gesamtbeurteilung wird unter Verwendung dieser Methode für jede Alternative die Summe der gewichteten Werte der Beurteilungskriterien gebildet. Dabei werden die für jede konkrete Alternative ermittelten Werteausprägungen der einzelnen Factor Maps, also der für die Entscheidung relevanten verräumlichten Beurteilungskriterien, zunächst mit den Gewichten multipliziert, die entsprechend der Präferenzen des Entscheidungsträgers (vgl. Kap. 3.4) diesen Kriterien jeweils zugewiesen wurden. Im Anschluss wird für jede Alternative die Summe der jeweiligen Ergebnisse berechnet.

Mathematisch lässt sich dieses Vorgehen in der folgenden Formel ausdrücken,

$$S_a = \sum x_{ai} * w_i \quad \text{[Formel 3]}$$

wobei  $S_a$  der Eignung (Suitability) der jeweiligen Alternative  $a$ ,  $x_{ai}$  dem Wert des Faktors  $i$  für die jeweilige Alternative  $a$  und  $w_i$  dem Wert des Gewichts zum Faktor  $i$  entspricht. Die Summe wird dabei über alle Factor Maps gebildet.

Abschließend lassen sich die einzelnen Alternativen im Hinblick auf das betrachtete Oberziel entsprechend des Gesamtwertes ihrer Eignung sortieren und in Relation zueinander bewerten. Die zu favorisierenden Alternativen weisen dabei die höchsten Eignungswerte auf (vgl. Eastman, 2006a, S. 129, 132 / Malczewski, 1999, S. 199 ff.).

#### **3.5.2 Ordered Weighted Average (OWA)**

Der im Kontext der Fuzzy-Set Theorie entstandene „Ordered Weighted Averaging“-Ansatz (OWA) verfolgt das Ziel, bestimmte Arten von Entscheidungsregeln so in einem Grundgerüst zusammenzuführen, dass dem Entscheidungsträger die Möglichkeit geboten wird, deren spezifische Eigenschaften miteinander zu kombinieren. Dabei wird zum einen das Ausmaß des Trade-Off zwischen den Kriterien, zum anderen das Ausmaß der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers einbezogen.

Die Unterscheidung von kompensatorischen und nicht-kompensatorischen Regeln stellt die Frage in den Mittelpunkt, ob die Möglichkeit besteht, zwischen den einzelnen Kriterien einen Ausgleich (Trade-Off) herzustellen.

Kompensatorische Regeln bedeuten, dass eine niedrige Werteausprägung hinsichtlich eines Kriteriums durch den Wert eines anderen Kriteriums ausgeglichen werden kann (vgl. Jungermann/Pfister/Fischer, 2005, S. 123 / Malczewski, 1999, S. 148 / Jankowski, 1995, S. 256). Insofern kann eine Alternative auch dann mit einer hohen Gesamtbeurteilung hinsichtlich ihrer Eignung versehen werden, wenn Kriterien mit geringen Werteausprägungen durch hohe Werte anderer Kriterien kompensiert werden können. Die im letzten Abschnitt behandelte WLC-Methode stellt eine Entscheidungsregel dar, in der die Gesamteignung auf Basis aller Kriterien entsprechend der jeweiligen Kriteriengewichte berechnet wird. Die Möglichkeit zum Trade-Off ist somit bei dieser Methode maximal ausgeprägt.

Nicht-kompensatorische Entscheidungsregeln können im Anschluss u. a. weiter untergliedert werden in konjunktive und disjunktive Regeln. Um bei Anwendung konjunktiver Entscheidungsregeln eine Alternative als geeignet ansehen zu können, müssen für alle relevanten Kriterien die definierten Schwellenwerte (cut-offs) überschritten werden.

Sobald ein Kriterium diesen Anforderungen nicht genügt, wird die entsprechende Alternative als nicht geeignet eingestuft. Disjunktive Entscheidungsregeln hingegen erfordern lediglich, dass mindestens ein Kriterium den definierten Schwellenwert überschreitet, d. h., eine Alternative wird nur dann als ungeeignet angesehen, wenn für alle betrachteten Kriterien die Schwellenwerte unterschritten werden (vgl. Jungermann/Pfister/Fischer, 2005, S. 121, 129 / Malczewski, 1999, S. 148 ff. / Jankowski, 1995, S. 259).

Während im ersten Fall die Entscheidung mit einer hohen Sicherheit verbunden ist, erhöht sich im zweiten Fall das Risiko eine falsche Entscheidung zu treffen aufgrund der Orientierung an nur einem entscheidungsrelevanten Kriterium deutlich. Je nach konkretem Anwendungszusammenhang und Präferenzen des Entscheidungsträgers kann entweder die eine oder die andere Variante zu einer angemessenen Modellierung beitragen. Eine solche Differenzierung in konjunktive und disjunktive Entscheidungsregeln kann für Kriterien vom Boolean-Datentyp (d. h. geeignet vs. nicht geeignet) durch die logischen Operatoren „AND“ und „OR“ ausgedrückt werden. Während logical AND (Intersection) die Schnittmenge der Alternativen bildet, für die hinsichtlich aller Kriterien die Bedingungen erfüllt sind, wird durch logical OR (Union) die Vereinigungsmenge der Alternativen generiert, für die jeweils für ein Kriterium die Bedingung erfüllt ist.

Neben der kompensatorischen WLC-Methode handelt es sich bei den beiden angeführten Boolean-Overlay-Operationen um die am weitesten verbreiteten Entscheidungsregeln (vgl. u. a. Malczewski, 2006b, S. 710).

Innerhalb des bislang modellierten Entscheidungsprozesses werden allerdings nicht nur Daten genutzt, die auf Basis definierter Eigenschaften eine Unterscheidung der Alternativen in geeignet und nicht geeignet ermöglichen (Boolean), sondern vor allem kontinuierlich ausgeprägte Beurteilungskriterien, die Aussagen über den Grad der jeweiligen Zielerreichung erlauben. Insofern sind die gerade formulierten Ausführungen zwar für das grundsätzliche Verständnis relevant, allerdings nicht ohne Weiteres auf alle Anwendungszusammenhänge übertragbar.

Bei der Nutzung kontinuierlich modellierter Daten wird stattdessen auf die Konzepte der Fuzzy Logik als Obermenge der konventionellen (d. h. Boolean) Logik zurückgegriffen, deren logische Operationen somit als Generalisierungen der Boolean Algebra angesehen werden können. Der MIN-Operator entspricht dabei in Fuzzy Logik dem

Charakter des AND-Operators der konventionellen Logik, der MAX-Operator dem des OR-Operators (vgl. Malczewski, 1999, S. 32 ff., 47 f., 234 f. / Eastman, 2006a, S. 133). Innerhalb eines Entscheidungsprozesses wird unter Anwendung des MIN-Operators jeder Alternative der kleinste Wert aller Kriterien zugewiesen, unter Anwendung des MAX-Operators der größte Wert aller Kriterien.

Eine Entscheidung für eine Alternative, die einen hohen Gesamteignungswert auf Basis des MIN-Operators erhalten hat, ist somit grundsätzlich mit einem sehr geringen Risiko verbunden, da der Gesamteignungswert dem geringsten aller Kriterienwerte entspricht, so dass die Werte aller anderen Kriterien mindestens ebenso hoch sind.

Sofern der Gesamteignungswert auf der Anwendung des MAX-Operators beruht, ist eine Entscheidung demgegenüber deutlich risikoreicher, da lediglich das Kriterium mit der höchsten Werteausprägung berücksichtigt wurde, andere Kriterien folglich deutlich geringere Eignungswerte aufweisen können. In dieser Hinsicht sind die Aussagen vergleichbar denen der konventionellen (Boolean) Logik.

Ziel des OWA-Ansatzes ist es, in Bezug auf die beiden angeführten Dimensionen Trade-Off und Risiko variierende Entscheidungsregeln anzubieten, wobei die drei bisher dargestellten Entscheidungsregeln WLC, AND/MIN und OR/MAX jeweils eine in einer Richtung extreme Ausprägung darstellen (vgl. Abb. 3-4).

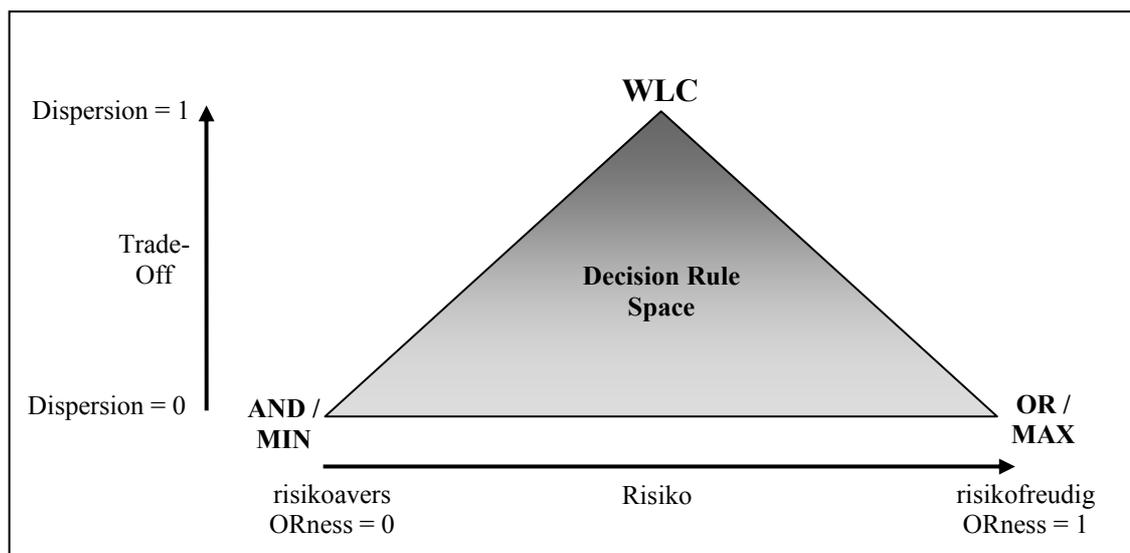
Ebenso wie die im letzten Abschnitt dargestellte WLC-Methode nutzt auch der OWA-Ansatz eine als „Factor Weight“ bezeichnete Gewichtung, welche die relative Bedeutung der einzelnen Kriterien zum Ausdruck bringt.

Zusätzlich wird jedoch eine zweite Gewichtung eingeführt, die der Ranking-Position der Kriterien zugewiesen wird (Order Weight). Bei dieser Vorgehensweise werden zunächst die Kriterien für jede Alternative entsprechend ihres Werts aufsteigend sortiert.<sup>8</sup> Im Anschluss wird das erste Order Weight dem niedrigsten Kriterienwert zugewiesen, das zweite Order Weight dem nächsthöheren Kriterienwert usw. Im Gegensatz zu den Factor Weights sind die Order Weights somit nicht kriterienspezifisch, d. h. nicht zwingend für alle Alternativen einer Factor Map einheitlich. Stattdessen kann derselbe Faktor je nach konkreter Ranking-Position für verschiedene Alternativen unterschiedliche Order Weights zugeordnet bekommen.

---

<sup>8</sup> Mit der Orientierung an einer aufsteigenden Reihenfolge wird dem Ansatz von Eastman gefolgt (vgl. Eastman, 2006a, S. 133 ff. / Jiang/Eastman, 2000, S. 179). Andere Autoren nutzen demgegenüber eine absteigende Reihenfolge (vgl. Boroushaki/Malczewski, 2008, S. 403 / Malczewski et al., 2003, S. 1771 / Malczewski, 1999, S. 234).

Durch Veränderungen der Order Weights besteht die Möglichkeit eine große Bandbreite an Entscheidungsregeln zu erzeugen, die sich im Hinblick auf das Ausmaß des Trade-Off und des Risikos unterscheiden (vgl. u. a. Eastman, 2006a, S. 133 ff. / Malczewski, 1999, S. 233 ff. / Malczewski et al., 2003, S. 1771). Begrenzt wird der zur Verfügung stehende Raum dabei durch die drei bereits angeführten speziellen Entscheidungsregeln, die in Bezug auf eine dieser beiden Ausprägungen eine extreme Position einnehmen (vgl. Abb. 3-4).



**Abb. 3-4: Kontinuum der Entscheidungsregeln im OWA-Ansatz**  
(Quelle: nach Eastman, 2006a, S. 135 sowie Jiang/Eastman, 2000, S. 180)

In der unteren linken Ecke des Dreiecks ist die konservativste, d. h. am wenigsten risikoreiche, Entscheidungsregel verortet. In der Terminologie des OWA-Ansatzes wird diese Lösung durch die Order Weights  $[1, 0, 0, \dots, 0]$  ausgedrückt. Demnach erhält der erste Faktorwert, bei einer aufsteigenden Sortierung folglich die geringste Werteausprägung, mit einem Wert von 1 das vollständige Gewicht zugeteilt (d. h. wird mit diesem multipliziert). Unabhängig von der Werteausprägung der restlichen Faktoren und deren spezifischer Factor Weights beträgt der Gesamtwert der übrigen Faktoren nach Zuweisung der Order Weights 0. Der als Addition aller Faktorenwerte berechnete alternativen-spezifische Gesamteignungswert ist somit identisch mit dem kleinsten Faktorwert. Die Factor Weights sind bei dieser Entscheidungsregel (und allen anderen Regeln, in denen kein Trade-Off modelliert wird) ohne Bedeutung (vgl. Eastman, 2006a, S. 136). Eine derartige dem Intersection-Operator der Fuzzy-Logik (MIN bzw. AND) entsprechende Modellierung bewirkt somit eine möglichst risikoarme Entscheidung, da Alter-

nativen ausschließlich unter Berücksichtigung ihrer schlechtesten Eigenschaften beurteilt werden. Eine Entscheidung auf dieser Grundlage schließt folglich die Gefahr einer negativen Überraschung aus. Gleichzeitig wird die Möglichkeit zum Trade-Off zwischen verschiedenen Kriterien dadurch verhindert, dass lediglich ein Kriterium in die Bewertung einbezogen wird.

Die im Hinblick auf die Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers entgegengesetzte Entscheidungsregel ist in Abb. 3-4 in der rechten unteren Ecke des Dreiecks abgebildet und lässt sich durch die Order Weights  $[0, 0, 0, \dots, 1]$  ausdrücken. Bei einer solchen Verteilung der Gewichte wird dem in der aufsteigend sortierten Reihenfolge letzten Faktor das vollständige Gewicht zugeteilt, so dass der Gesamteignungswert einer Alternative durch den höchsten Faktorwert bestimmt wird. Da bei dieser dem Union-Operator der Fuzzy-Logik (MAX bzw. OR) entsprechenden Vorgehensweise lediglich das beste Kriterium in die Entscheidung einbezogen wird, während die übrigen Faktoren ungeachtet ihrer konkreten Werte ausgeblendet werden, ist eine auf dieser Grundlage getroffene Entscheidung als maximal optimistisch und risikoreich zu betrachten. Allerdings kann auch bei dieser Entscheidungsregel, analog zur zuvor geschilderten Regel, aufgrund der Beschränkung auf nur ein berücksichtigtes Kriterium kein Trade-Off zwischen den Kriterien stattfinden.

Im Gegensatz hierzu besteht die Möglichkeit zum vollständigen Trade-Off, wenn alle Faktoren unabhängig von ihrer jeweiligen Ranking-Position mit gleichem Gewicht in die Beurteilung einfließen können. Die Umsetzung im OWA-Ansatz erfolgt somit durch eine gleichmäßige Aufteilung des zur Verfügung stehenden Gewichts auf alle Faktoren und kann durch die folgende Darstellung ausgedrückt werden:  $[1/n, 1/n, 1/n, \dots, 1/n]$ , wobei  $n$  der Anzahl der Faktoren entspricht. Da auf diese Weise die Ranking-Position eines Faktors für die Beurteilung unerheblich und der Gesamteignungswert einer Alternative lediglich von den Werteausprägungen der einzelnen Faktoren sowie deren jeweils relativer Bedeutung abhängig ist, ist eine derartige Modellierung identisch mit der im letzten Abschnitt vorgestellten WLC-Methode. Dadurch dass sowohl niedrige als auch hohe Werteausprägungen in die Beurteilung einbezogen werden, erstere allerdings durch letztere kompensiert werden können, ist der Grad des mit dieser Entscheidungsregel verbundenen Risikos als mittelmäßig einzustufen (vgl. Eastman, 2006b, S. 114 f.).

Bei den drei betrachteten Entscheidungsregeln, WLC, AND/MIN, OR/MAX, handelt es sich um weit verbreitete Formen der räumlichen Analyse, die unter Berücksichtigung

des OWA-Ansatzes als extreme Ausprägungen innerhalb einer theoretisch unendlich großen Anzahl an Entscheidungsregeln angesehen werden können (vgl. u. a. Eastman, 2006a, S. 134 f. / Malczewski, 2006a, S. 9f. / Boroushaki/Malczewski, 2008, S. 403). Jede der innerhalb des in Abb. 3-4 dargestellten Kontinuums liegenden Entscheidungsregeln dient somit unter Einbezug eines jeweils speziellen Grads an Trade-Off und Risikobereitschaft dazu, die in den Factor Maps vorliegenden Informationen im Hinblick auf eine Gesamtbeurteilung der Alternativen zusammenzuführen.

Das Ausmaß des Trade-Off wird dabei durch die relative Verbreitung (Dispersion) der Gewichte zwischen den Faktoren gesteuert. Je konzentrierter die Order Weights sind, umso geringer ist der Trade-Off, je gleichmäßiger verteilt sie sind, umso größer ist dieser. Eine Order-Weight-Kombination von  $[0,1 / 0,8 / 0,1]$  würde somit beispielsweise einen deutlich geringeren Trade-Off bedeuten als eine Kombination von  $[0,3 / 0,4 / 0,3]$ . Der Grad des mit der Entscheidung verbundenen Risikos wird demgegenüber durch die Positionierung der Gewichte beeinflusst. Je weiter und größer der Anteil der Gewichte im linken Bereich der aufsteigend sortierten Faktoren liegt, umso geringer ist das Risiko. Umgekehrt wird eine Entscheidung umso risikofreudiger, je weiter und größer der Anteil der Order Weights im rechten Bereich der aufsteigend sortierten Faktoren ist. Dies entspricht der Neigung bei Risikoaversion die schlechteren Aspekte höher zu bewerten, bei risikofreudigem Optimismus die positiveren Aspekte (vgl. Eastman, 2006a, S. 134 f. / Malczewski, 1999, S. 237 / Malczewski, 2006a, S. 9f. / Malczewski et al., 2003, S. 1772).

Um die Position einer auf Basis spezifischer Order Weights gebildeten Entscheidungsregel innerhalb des in Abb. 3-4 dargestellten Kontinuums zu klassifizieren, wurden Maßzahlen entwickelt, die den Grad der jeweiligen Risikobereitschaft und des Trade-Off ausdrücken (vgl. u. a. Yager, 1988, S. 184, 187 ff. / Malczewski, 1999, S. 235 f. / Jiang/Eastman, 2000, S. 179 f.).

Die beiden in Abhängigkeit von der Anzahl der relevanten Kriterien, dem Wert des Order Weights sowie dessen Ranking-Position zu berechnenden komplementären Indikatoren ANDness und ORness stehen dabei für eine ab- bzw. zunehmende Risikobereitschaft. Ein ANDness-Wert von 1 (bzw. ORness-Wert von 0) bedeutet somit maximale Risikoaversion, ein ORness-Wert von 1 (bzw. ANDness-Wert von 0) maximale Risikobereitschaft.

Der Trade-Off-Indikator bzw. Dispersionsindex wird auf Basis der Anzahl der relevanten Kriterien sowie der Order Weights berechnet. Entsprechend dem zuvor Dargestellten nimmt der Index bei Gleichverteilung der Order Weights seine maximale Ausprägung von 1 an.

In der auf den Überlegungen von Eastman aufbauenden Umsetzung des OWA-Ansatzes in dem Softwareprodukt IDRISI-Andes kann der Entscheidungsträger die einzelnen Order Weights flexibel bestimmen. Vorausgesetzt wird dabei jedoch, die jeweiligen Neigungen hinsichtlich Risikobereitschaft und Trade-Off in die entsprechenden Order Weights übersetzen zu können.

Dem stehen verschiedene Ansätze gegenüber, in denen unterschiedliche Methoden zur Ableitung der Order Weights vorgeschlagen werden (vgl. Malczewski, 2006a, S. 8).

Malczewski entwickelt hierzu auf Basis des von O'Hagan beschriebenen „Maximum-Entropy“-Ansatzes eine unter loser Kopplung mit anderen Softwareprodukten für Arc-View 3.2 umgesetzte als „Parameterized-OWA“-Methode bezeichnete Vorgehensweise. Dabei werden unter Berücksichtigung eines durch den Entscheidungsträger bestimmten Ausmaßes an Risikobereitschaft (ORness-Parameter) die Order Weights berechnet, die einen jeweils maximalen Trade-Off bedeuten (vgl. O'Hagan, 1990, S. 598 ff. / Malczewski, 2006a, S. 8 ff. / Malczewski et al., 2003, S. 1771 ff.).

Auch wenn unter Anwendung dieses Ansatzes nicht das Erfordernis zur freien und somit vor allem bei einer großen Zahl zu berücksichtigender Kriterien oftmals eher intuitiven Herleitung der Order Weights besteht, bedeutet diese Vorgehensweise gleichzeitig eine Beschränkung auf besondere Arten von Entscheidungsregeln. Der Entscheidungsträger kann lediglich den Grad seiner Risikofreudigkeit frei wählen, jedoch nicht gleichzeitig das Ausmaß des gewünschten Trade-Off zwischen den Kriterien. Der Grad des Trade-Off wird stattdessen unter Berücksichtigung des „Maximum-Entropy“-Ansatzes implizit durch die Wahl der Risikobereitschaft auf die jeweils maximal mögliche Höhe fixiert. Statt der Möglichkeit zur freien Bewegung innerhalb des in Abb. 3-4 dargestellten Kontinuums, können, unter Orientierung an der angeführten vereinfachenden Abbildung, somit lediglich Entscheidungsregeln entlang des oberen Dreiecksrandes gewählt werden.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Tatsächlich folgt das in einem Koordinatensystem (Y-Achse: Trade-Off / X-Achse: Risiko) verortete Verhältnis von ORness und jeweils maximaler Dispersion in dem von Malczewski vorgestellten Ansatz nicht der Außenkante des dargestellten Dreiecks, sondern einer nach unten geöffneten Parabel (vgl. hierzu Malczewski et al., 2003, S. 1780).

Eine weitere Herangehensweise bietet der Ansatz von Boroushaki/Malczewski, in dem die Order Weights unter Anwendung so genannter „Fuzzy Linguistic Quantifiers“ gebildet werden. In diesem Konzept werden aus dem allgemeinen Sprachgebrauch entlehene Begriffe in Parameter überführt, die im Anschluss in mathematische Berechnungen integriert werden können (vgl. Zadeh, 1983). Boroushaki/Malczewski modellieren hierzu regelmäßig ansteigende monotone Quantifier, durch deren Auswahl beeinflusst wird, wie viele der entscheidungsrelevanten Kriterien in einer annehmbaren Alternative zufrieden stellend berücksichtigt werden. Zur Verfügung stehen dabei die Linguistic Quantifier „at least one“, „few“, „some“, „half“, „many“, „most“ und „all“. Auf Basis der durch den Entscheidungsträger getroffenen Auswahl werden im Anschluss durch das für die Software ArcGIS erstellte Tool die jeweiligen Order Weights berechnet. Der zuletzt genannte Quantifier (all) erzeugt dabei ein risikoaverses Worst-Case-Szenario, der erste Quantifier (at least one) dessen maximal optimistisches Gegenteil. Der mittlere Quantifier (half) generiert ein der WLC-Methodik entsprechendes Ergebnis (vgl. Boroushaki/Malczewski, 2008, S. 403 ff. / Malczewski, 2006c, S. 272 ff. / Malczewski/Rinner, 2005, S. 254 ff.).

Ebenso wie bei dem zuvor angeführten Ansatz bietet auch die zuletzt aufgezeigte Vorgehensweise grundsätzlich den Vorteil, dem Entscheidungsträger die insbesondere bei einer hohen Kriterienzahl komplexe Herleitung der Order Weights durch die Orientierung an einem einzigen Parameter zu erleichtern. Untrennbar hiermit verbunden ist aber auch bei dem von Boroushaki/Malczewski entwickelten Ansatz die Beschränkung der großen Bandbreite grundsätzlich verfügbarer Entscheidungsregeln auf eine deutlich geringere Anzahl.

#### **3.5.3 Analytic Hierarchy Process (AHP)**

Im Hinblick auf die zentrale Rolle von Entscheidungsregeln, die vorliegenden Informationen zusammenzuführen und die Alternativen entsprechend ihrer Eignung für die Zielerreichung zu ordnen, kann auch der Ansatz des Analytic Hierarchy Process (AHP) als eine solche angesehen werden (vgl. Malczewski, 1999, S. 217 ff. / Jankowski, 1995, S. 257 f.). Im direkten Vergleich zur WLC-Methode bzw. zu dem im letzten Abschnitt vorgestellten umfassenderen OWA-Ansatz setzt der AHP jedoch auf einer anderen Ebene an.

Die grundlegende Funktion des AHP besteht in der Strukturierung eines ggf. komplexen Entscheidungsproblems in ein hierarchisches Gerüst, in dem alle für die Entscheidungsfindung wesentlichen Elemente enthalten sind. Ausgehend von dem obersten mit der Entscheidung unmittelbar verbundenen Ziel werden sukzessive konkretere Unterziele entwickelt, die für die Erreichung des jeweils übergeordneten relevant sind. In Kapitel 3.1 wurde die Notwendigkeit behandelt, die Entscheidungssituation möglichst umfassend und detailliert zu analysieren, um die relevanten Beurteilungskriterien fundiert zu ermitteln. Eine derartige zu Beginn des Entscheidungsprozesses verfolgte Vorgehensweise kann somit bereits wertvolle Ergebnisse für die erste Stufe des AHP liefern.

Nach Strukturierung des Entscheidungsproblems werden, der erzeugten Hierarchie stufenweise von oben nach unten folgend, die jeweiligen Kriterien (Ziele und Attribute) im Hinblick auf ihre relative Bedeutung für die Erreichung des höheren Ziels mittels des Instruments des paarweisen Vergleichs (vgl. Kap. 3.4) beurteilt. Die auf diese Weise für die einzelnen Ebenen berechneten relativen Gewichte können in einem abschließenden Schritt für die unterste Stufe durch Multiplikation aller Einzelgewichte zu einem Gesamtgewicht zusammengefügt werden und somit die Aggregation bestimmen (vgl. Malczewski, 1999, S. 220 / Boroushaki/Malczewski, 2008, S. 400 ff.).

#### **3.5.4 Kombination von AHP und OWA**

Insgesamt kann der AHP-Ansatz durch die hierarchische Strukturierung der vollständigen Entscheidungssituation und die ebenenübergreifende Zusammenführung der jeweiligen gewichteten Informationen als ein auch sehr komplexe Problemsituationen umfassendes Tool angesehen werden. Bei der Anwendung auf räumlich darstellbare Entscheidungsprobleme werden die einzelnen Informationen auf jeder Stufe der Hierarchie unter Berücksichtigung des jeweils höheren Ziels mittels einfacher additiv gewichteter Kombinationen zusammengefügt. An dieser Stelle besteht die Möglichkeit den OWA-Ansatz

in die Struktur des AHP-Ansatzes einfließen zu lassen und auf diese Weise Potenziale beider zu verbinden.

Der OWA-Ansatz bietet ein breites Spektrum unterschiedlicher Entscheidungsregeln, kann diese aber nur auf jeweils eine Entscheidungshierarchieebene anwenden. Der AHP hingegen kann eine Strukturierung der Entscheidungssituation in eine miteinander in Beziehung stehende Vielzahl derartiger Ebenen leisten sowie durch die Methode des paarweisen Vergleichs die erforderlichen Gewichte als Maß der relativen Bedeutung der jeweiligen Kriterien (Ziele und Attribute) berechnen (d. h. die Factor Weights). Durch die Nutzung des OWA-Ansatzes innerhalb der Struktur des AHP-Ansatzes kann auf allen zu betrachtenden Hierarchieebenen die Zusammenführung der Informationen unter Berücksichtigung der speziellen Neigung des Entscheidungsträgers hinsichtlich Risikobereitschaft und Trade-Off erfolgen (vgl. Boroushaki/Malczewski, 2008, S. 400 ff. / Malczewski, 1999, S. 222 f.).

Eine derartige Kombination ausgewählter Elemente beider Ansätze kann somit möglicherweise dazu beitragen, die Modellierung eines realitätsnahen Entscheidungsfindungsprozesses zu verbessern und soll aus diesem Grund im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommen.

#### **3.6 Sensitivitätsanalyse**

Den Abschluss eines Entscheidungsprozesses stellt die Empfehlung für eine mehr oder weniger große Menge an Alternativen dar, die im Hinblick auf die grundsätzliche Zielsetzung als besonders geeignet angesehen werden können.

Bevor eine solche Empfehlung ausgesprochen wird, sollten jedoch als besonders kritisch angesehene Variablen innerhalb des Prozesses einer näheren Prüfung unterzogen werden, in welchem Maße sie sich auf die abschließende Entscheidungsgrundlage auswirken. Hierzu werden im Rahmen einer iterativen Sensitivitätsanalyse Veränderungen an den Gesamtbeurteilungswerten der einzelnen Alternativen in Abhängigkeit von moderaten Variationen bestimmter Prozessvariablen beobachtet. Die Robustheit einer Empfehlung ist umso größer, je weniger die für die Entscheidung relevanten Resultate durch derartige Variationen beeinflusst werden (vgl. Malczewski, 1999, S. 261 ff., 192 f. / Zhou/Lin, 2008, S. 1046 f. / Geldermann/Zhang/Rentz., 2003, S. 148 / Bitz/Ewert/Terstege, 2002, S. 217 ff.).

Die wichtigsten in einer solchen Analyse zu betrachtenden Elemente sind oftmals die Wertausprägungen der Eingangsdaten (Attributwerte) und die Kriteriengewichte. Aufgrund einer häufig nur eingeschränkten Genauigkeit und Verlässlichkeit der in den Entscheidungsprozess einfließenden Eingangsdaten sowie einer in der Regel stark subjektiv geprägten Einschätzung der relativen Bedeutung der einzelnen Entscheidungskriterien ist der Einfluss dieser Variablen von hoher Bedeutung für die Beurteilung der Aussagekräftigkeit einer abschließenden Empfehlung.

Daneben kann jedoch auch die Auswahl der Entscheidungsregel einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse ausüben. Bezogen auf den im letzten Abschnitt angeführten OWA-Ansatz ist die Wahl des in den Order Weights zum Ausdruck gebrachten Ausmaßes an Risikobereitschaft und Trade-Off in der Regel als ebenso subjektiv geprägt anzusehen wie die Bestimmung der Factor Weights. Auch in dieser Hinsicht sollten somit die Auswirkungen auf die abschließenden Empfehlungen geprüft werden.

Da hinsichtlich der Entscheidungsregeln verschiedene Ansätze zum Teil unterschiedliche methodische Herangehensweisen nutzen, kann unter Umständen zusätzlich auch die Anwendung eines grundsätzlich anderen Ansatzes eine sinnvolle Möglichkeit darstellen, die Robustheit der Ergebnisse zu überprüfen.

Die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse kann dabei auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Im einfachsten Fall werden die Auswirkungen auf die Ergebnisse beobachtet, wenn unter Fixierung des Großteils des Modells jeweils nur einzelne der angeführten Variablen verändert werden. In komplexeren Untersuchungen werden darüber hinaus die sich aus der gleichzeitigen Veränderung mehrerer Variablen ergebenden kombinierten Effekte betrachtet. Die „Analytical Error Propagation“-Methode und die „Monte Carlo Simulation“ können als beispielhafte Ansätze für derartige Analysen angeführt werden (vgl. Malczewski, 1999, S. 269 ff.).

Insgesamt stellt die Sensitivitätsanalyse einen wichtigen Verfahrensschritt innerhalb des Entscheidungsprozesses dar, der zu einem tieferen Verständnis der konkreten Modellierung des Entscheidungsproblems beitragen kann. Der Umfang der notwendigen Auseinandersetzung ist dabei in hohem Maße von dem Erfordernis zur Robustheit der Empfehlung abhängig, d. h. unter anderem von der Bedeutung der Entscheidung. Sofern durch eine Sensitivitätsanalyse für bestimmte Entscheidungselemente ein besonderer Einfluss auf die Ergebnisse ermittelt wurde, sollten diese Informationen auch in die abschließende Empfehlung transparent einbezogen werden.

## **4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es einen Ansatz zu finden bzw. zu prüfen, um als Teil der eingangs geschilderten Gesamtproblematik die aus Umweltsicht möglichst optimale Verortung von Wohnbebauung in dem ausgewählten Untersuchungsgebiet zu ermitteln. Zur Erstellung einer mit technischen Mitteln erzeugten rational nachvollziehbaren Entscheidungsgrundlage wird eine Kombination verschiedener Methoden der geographischen Informationsverarbeitung und der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung zunächst als sinnvoll einsetzbare Herangehensweise betrachtet und soll auf ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf die Aussagekräftigkeit bzw. Verlässlichkeit der berechneten Ergebnisse näher beleuchtet werden.

Im letzten Kapitel wurden die theoretischen Grundlagen des gewählten Ansatzes erarbeitet. Als gliedernde Struktur diente dabei die modellhafte Abbildung eines Entscheidungsfindungsprozesses (vgl. Abb. 3-1). Im Folgenden wird auf dieser Basis die Modellierung der in dieser Arbeit konkret zu untersuchenden Entscheidungssituation erfolgen. In den folgenden Kapiteln werden somit zum einen die Kriterien behandelt, durch welche die Entscheidungsfindung beeinflusst (Kap. 4.1) und eingeschränkt (Kap. 4.2) wird, zum anderen die Präferenzen des Entscheidungsträgers hinsichtlich deren relativer Bedeutung (Kap. 4.3) sowie die in dieser Arbeit betrachteten Entscheidungsregeln, durch welche die einzelnen Daten zusammengeführt werden (Kap. 4.4).

### **4.1 Beurteilungskriterien**

Entsprechend der Ausführungen des letzten Kapitels sind im Rahmen einer Analyse der konkreten Problem- bzw. Entscheidungssituation (d. h. der aus Umweltsicht optimalen Verortung von Wohnstandorten) zu Beginn alle wesentlichen für eine sachgerechte Entscheidungsfindung erforderlichen Aspekte zu bestimmen sowie in eine die mehr oder weniger komplexe Sachlage angemessen strukturierende Form zu überführen.

Zur Ermittlung der für die betrachtete Frage als relevant anzusehenden Beurteilungskriterien wurden unterschiedliche Informationsquellen ausgewertet. Neben der Lektüre von Fachliteratur (u. a. Kaule, 2002 / Sukopp/Wittig, 1998 / Weiland/Wohlleber-Feller, 2007 / Jessel/Tobias, 2002) wurde die Bauleitplanung verschiedener Städte auf die Frage untersucht, welche umweltbezogenen Aspekte in den jeweiligen Planungen, insbesondere bei der Ausweisung neuer Wohngebiete, Berücksichtigung gefunden haben.

Beispielhaft sei hierfür die Aufstellung des Regionalen Flächennutzungsplans für den Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main herausgestellt (vgl. Stock/Gründler, 2007). Im Anschluss wurde geprüft, welche der ermittelten Kriterien für das hier betrachtete Untersuchungsgebiet als relevant angesehen sowie welche Kriterien aufgrund der besonderen Situation vor Ort ggf. ergänzt werden müssen. Hierzu wurden Gespräche mit Vertretern der verschiedenen Fachgebiete des Umweltamts geführt.

Insgesamt konnte auf diese Weise eine größere Anzahl an Kriterien ermittelt werden, die grundsätzlich in eine umfassende Modellierung der Entscheidungssituation einfließen sollte. Da eine solche vollständige Behandlung im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht geleistet werden konnte, musste unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse und der in Kapitel 3.1.1 angeführten Aspekte zwangsläufig eine Begrenzung auf eine deutlich geringere Anzahl erfolgen. Die Auswahl der im Weiteren zu berücksichtigenden Kriterien wurde dabei von dem Ziel geleitet, trotz erforderlicher Beschränkungen eine möglichst angemessene Modellierung des Entscheidungsproblems zu erzeugen, die zwar primär für das hier betrachtete Untersuchungsgebiet von Relevanz ist, im Hinblick auf eine potenzielle Übertragbarkeit aber, nicht nur in Bezug auf die grundsätzliche Vorgehensweise sondern auch auf die konkrete Form, gleichzeitig auch für andere Städte (zumindest des angrenzenden Ruhrgebiets) eine möglichst große Gültigkeit besitzt. Zudem musste letztlich auch der Frage der Datenverfügbarkeit eine nicht unerhebliche Bedeutung beigemessen werden.

Die Strukturierung der Entscheidungssituation erfolgte durch ein hierarchisches Gerüst zunehmend präziser werdender Zielsetzungen. An der Spitze steht demnach die grundsätzlich zu betrachtende Frage nach Standorten für eine aus Umweltsicht optimale Verortung von Wohnbebauung. Auf der nächsten Ebene werden zwei unterschiedliche Themenbereiche formuliert, die beide unter Berücksichtigung des Baugesetzbuchs (BauGB) im Hinblick auf die Umweltbelange zu beachten sind. Einerseits handelt es sich dabei in einer verallgemeinerten Form um den Schutz (der Wohnnutzung bzw. der dort wohnenden Menschen) vor umweltspezifischen Vorbelastungen, andererseits um den Schutz vorhandener Umweltqualitäten (vor der Wohnbebauung). Beide Zielformulierungen werden auf einer weiteren Ebene durch verschiedene Unterziele präzisiert. Im Bereich der Vorbelastungen bedeutet dies den Schutz vor durch den Boden oder die Luft ausgehenden Schadstoffen, durch den Straßenverkehr verursachten Schallemissionen sowie gewerblichen Emissionen, bezogen auf die vorhandenen Umweltqualitäten den Schutz des Freiraums, der Natur und des Trinkwassers. Mit allen Zielen dieser Ebe-

ne steht jeweils unmittelbar mindestens ein Attribut in Verbindung, durch das der Grad der Zielerreichung letztlich ausgedrückt werden soll.

Die hieraus resultierende „Zielpyramide“ kann Abbildung 4-1 entnommen werden. Die Abbildung dient dabei gleichzeitig als Gliederungsschema der folgenden Unterkapitel. Zudem bringt sie die Ebenen der in späteren Abschnitten zu betrachtenden Datenaggregationen zum Ausdruck und kann somit auch für diese Kapitel (Kap. 4.3 und Kap. 4.4), als Orientierung genutzt werden.

Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass wie beschrieben sowohl im Hinblick auf die einbezogenen Zielsetzungen als auch auf die diese operationalisierenden Attribute prinzipiell eine deutlich größere Anzahl einbezogen werden könnte, wodurch die hierarchische Struktur nicht nur breiter sondern auch höher ausfallen würde. Ebenso wären ggf. auch andere Zielpyramiden denkbar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird allerdings eine Beschränkung auf die in dieser Struktur angeführten Themenbereiche erfolgen.

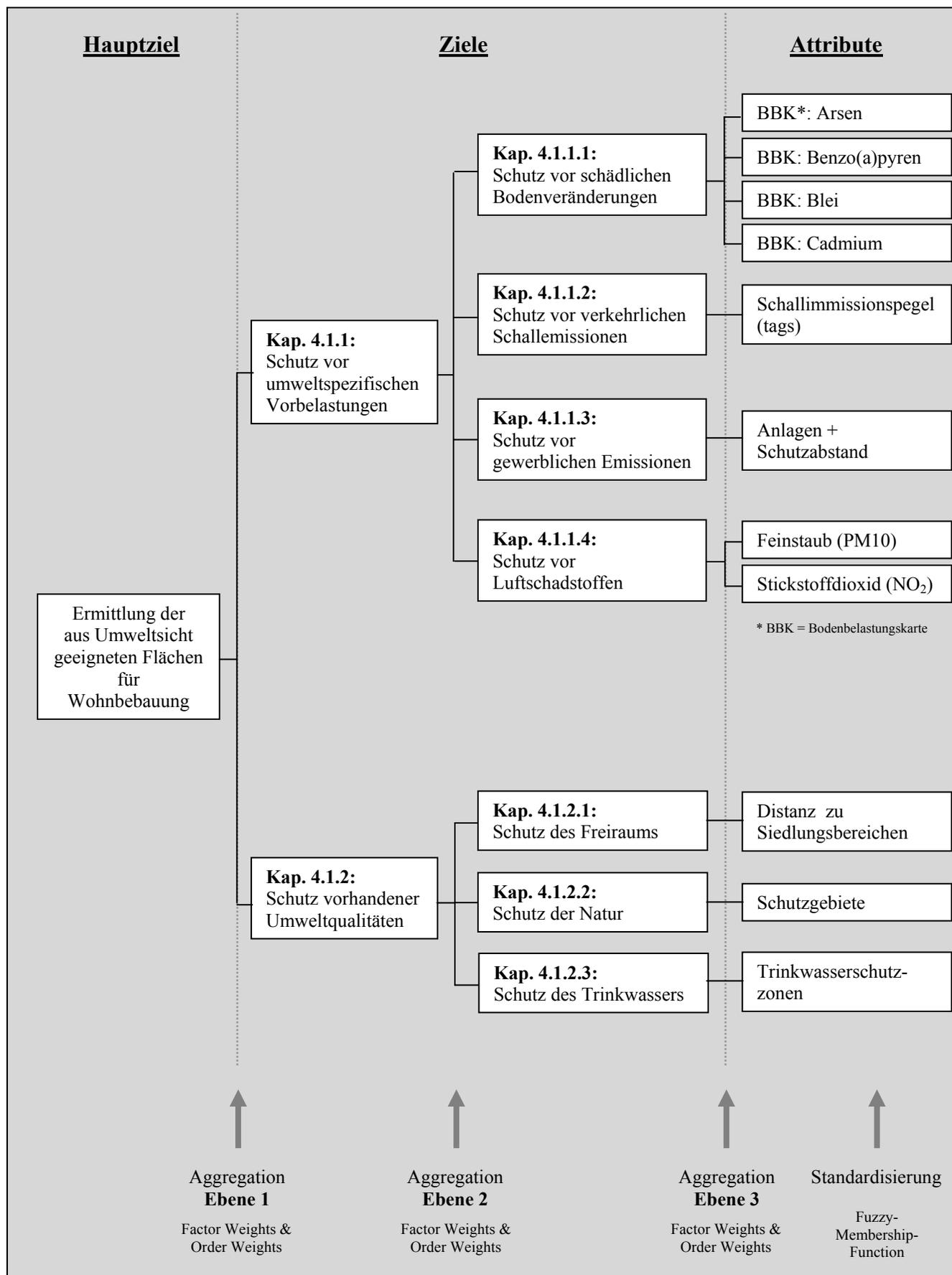


Abb. 4-1: Hierarchische Strukturierung der Entscheidungssituation (Zielpyramide / Entscheidungsbaum)

In den aufgeführten Unterkapiteln werden die einzelnen Themenbereiche jeweils näher betrachtet. Dabei wird es zum einen darum gehen, die grundsätzliche Bedeutung des als Entscheidungskriteriums in die weiteren Analysen einzubeziehenden Aspekts sowie dessen spezielle Relevanz für das hier betrachtete Untersuchungsgebiet anzuführen. Zum anderen werden die Art der verwendeten Datengrundlage (inklusive verschiedener Einschränkungen) und deren Aufbereitung mittels angemessener GIS-Methoden für die weiteren Arbeitsschritte im Blickfeld stehen. Für jedes der in Abbildung 4-1 dargestellten Attribute wird ein in geeigneter Weise aufbereiteter Kartenlayer mittels einer Fuzzy-Membership-Funktion in eine standardisierte Kriterienkarte (Eignungskarte) überführt, durch die jeder Alternative im Untersuchungsgebiet (d. h. den einzelnen Rasterzellen) ein kriterienspezifischer Eignungswert zugewiesen wird.

Die obere Grenze des Wertebereichs bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die entsprechende Alternative unter Berücksichtigung des jeweiligen Kriteriums für eine Wohnnutzung als uneingeschränkt geeignet angesehen werden kann. Die untere Grenze des Wertebereichs indiziert demgegenüber, dass in Bezug auf die betrachteten Vorbelastungen eine Wohnnutzung nur realisierbar ist, sofern zuvor detaillierte Einzeluntersuchungen bzw. weitere Vorkehrungen erfolgt sind, um ggf. tatsächlich vorhandene schädliche Einwirkungen abzumildern (z. B. durch die Umsetzung von Lärmschutzmaßnahmen oder Bodensanierungen). In Bezug auf die Umweltqualitäten ist eine vergleichbare Aussage deutlich schwieriger zu treffen, so dass jeweils spezielle Modellierungen auf Basis von ausdrücklich formulierten Annahmen vorgenommen werden.

Im Hinblick auf die Aussagefähigkeit der erstellten Eignungskarten ist bei deren Generierung prinzipiell von zentraler Bedeutung, dass die Transformationsfunktionen, wie in Kapitel 3.1.2 dargestellt, auf Basis (exogener) fachlich fundierter Vorgaben definiert werden. Hierzu werden für alle betrachteten Umweltbelange bzw. Kriterien die jeweils relevanten Anforderungen (z. B. in Form von normativen Regelwerken) ermittelt und als Grundlage für die Modellierung der Eignungskarten genutzt. Da der Wahl der konkret zu nutzenden Beurteilungsgrundlagen dabei eine außerordentlich große Bedeutung für die jeweils generierten Zwischenergebnisse zukommt, wird dieses Thema an verschiedenen Stellen sehr bewusst mit größerer Aufmerksamkeit betrachtet.

Die derart erzeugten Kriterienkarten werden im weiteren Verlauf der Bearbeitung, d. h. in den anschließenden Kapiteln 4.2 bis 4.4, unter Einbezug weiterer Modellparameter sukzessive der Zielpyramide aufsteigend folgend zu umfassenderen Beurteilungs- bzw. Entscheidungsgrundlagen (Eignungskarten) aggregiert.

Die Aufbereitung der als Eingangsdaten genutzten Kartenlayer erfolgte über verschiedene durch die Software ArcGIS 9.2 sowie deren Erweiterung „Spatial Analyst“ bereitgestellte Funktionalitäten. Die Umrechnung in standardisierte Eignungskarten sowie die im Weiteren erforderlichen Verschneidungen wurden mittels des flexiblen MCDM-Tools der Software IDRISI-Andes betrieben. Entgegen der allgemein formulierten Ausführungen in Kapitel 3.1.2 wird für die standardisierten Eignungskarten dabei kein Wertebereich von 0 bis 1, sondern aus Softwaregründen ein Wertebereich von 0 bis 255 berechnet, wobei ein Wert von 255 einer vollständigen Eignung entspricht. Um die Daten unter Einsatz der Software IDRISI miteinander verschneiden zu können, müssen alle Kriterienkarten in der gleichen Auflösung und in den gleichen Ausmaßen vorliegen. Hinsichtlich der Auflösung wurde eine Rasterzellengröße von 10 Metern gewählt, so dass die einzelnen Alternativen eine Flächengröße von 100 m<sup>2</sup> aufweisen.<sup>10</sup> Die kartographische Gestaltung der letztlich dargestellten Karten wurde schließlich aufgrund der entsprechenden vielseitigen Möglichkeiten dieser Software wieder mit ArcGIS 9.2 durchgeführt.

---

<sup>10</sup> Die gewählte räumliche Auflösung von 10 Metern ist grundsätzlich durchaus diskussionsbedürftig, insbesondere vor dem Hintergrund der teilweise deutlich geringer aufgelösten Eingangsdaten. Dennoch wurde zu Beginn der Bearbeitung diese Auflösung den Untersuchungen zugrunde gelegt und trotz einiger Zweifel im Weiteren beibehalten.

### **4.1.1 Schutz vor umweltspezifischen Vorbelastungen**

In diesem ersten Zweig des Entscheidungsbaums wird zunächst auf Umweltthemen eingegangen, die aufgrund spezieller Ausprägungen zu einer Beeinträchtigung der Gesundheit der in den projektierten Wohngebieten lebenden Menschen führen können und spätestens in einem solchen Fall als Vorbelastungen einzustufen sind. Angesichts des gesetzlichen Auftrags im Zuge einer geordneten städtebaulichen Entwicklung die Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sowie die umweltbezogenen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zu berücksichtigen (vgl. BauGB, § 1 Abs. 6.1 / Abs. 6.7c), kommt diesem Themenfeld eine erhebliche Bedeutung zu.

#### **4.1.1.1 Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen**

Große Bereiche urbaner Böden weisen im Vergleich zu ihrem natürlichen Zustand meist erhebliche Veränderungen ihrer Eigenschaften auf. Neben der damit oft verbundenen Einschränkung natürlicher Bodenfunktionen und Folgen für verschiedene Umweltbestandteile können sich zudem zum Teil negative Auswirkungen auf die hier im Vordergrund stehende menschliche Gesundheit ergeben (vgl. Sukopp/Wittig, 1998, S. 83, S. 90 ff., 168 ff., 186 ff.).

Im dicht besiedelten Ruhrgebiet hat nicht zuletzt die Industrialisierung in hohem Maße dazu beigetragen, Böden durch anthropogene Auf- und Abträge sowie die Einbringung natürlicher oder technogener Substrate massiv zu beeinflussen und nicht selten mit unterschiedlichen Schadstoffen zu belasten (vgl. Hiller/Meuser, 1998).

In Duisburg sind weite Teile des Stadtgebietes geprägt durch fast flächendeckende Umlagerungen des Bodens sowie dessen Beeinflussung durch technogene Substrate wie Bauschutt, Schlacken, Aschen, Bergematerial, Müll und Schlämme (vgl. Kuylaars, 2007, S.1 ff.). Neben diesen Altablagerungen sind eine Vielzahl ehemaliger Standorte ausgewählter Industrieanlagen und Gewerbebetriebe als Altlastenverdachtsflächen eingestuft.

Auch wenn aus diesen beiden Themenfeldern mitunter erhebliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zu erwarten sind, kann dieser Aspekt aufgrund fehlender belastbarer Daten im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden.

Stattdessen werden schädliche Bodenverunreinigungen betrachtet, die vor allem im Laufe der industriellen Entwicklung bis heute durch immissionsbedingte Schadstoffeinträge entstanden sind. Hierzu wird die digitale Bodenbelastungskarte (BBK) der Stadt Duisburg genutzt, die für verschiedene Schadstoffe die durch Staubdepositionen verur-

sachten Belastungen der oberen Bodenschichten für den Siedlungs- und den Außenbereich flächenhaft darstellt. Die Bodenbelastungskarte wurde mittels einer auf dem Kriging-Verfahren beruhenden Interpolation erstellt, der zum einen Immissionsdaten zum anderen Bodendaten aus systematisch ausgewählten punktuellen Probennahmestellen, nutzungsabhängig der oberen 10 bzw. 30 cm des Bodens, zugrunde liegen (vgl. Barowski et. al., 2002).

Durch den langjährigen Eintrag immissionsbedingter überwiegend industrieller Schadstoffe lassen sich auf diese Weise in bestimmten Bereichen des Duisburger Oberbodens zum Teil erhebliche Belastungen insbesondere mit unterschiedlichen Schwermetallen beobachten. Grundsätzlich können die Berechnungen der Bodenbelastungskarte somit einen ersten Anhaltspunkt für den Verdacht auf schädliche Bodenveränderungen bieten. Aufgrund der weiträumig besonderen Relevanz werden im vorliegenden Zusammenhang die Daten der Bodenbelastungskarte für die Stoffe Arsen, Blei und Cadmium sowie Benzo(a)pyren als Leitkomponente für Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) genutzt.

Eine durch den Boden verursachte Gesundheitsgefährdung für den Menschen kann grundsätzlich über verschiedene Wirkungspfade erfolgen. Neben einer Beeinträchtigung durch belastetes Grundwasser sind hierbei vor allem der direkte Bodenkontakt und der Verzehr von Nutzpflanzen von Bedeutung (vgl. Hiller/Meuser, 1998, S. 93 ff. / Sukopp/Wittig, 1998, S. 90 ff.).

Zur Bewertung der Belastungssituation stellt die Bundesbodenschutzverordnung (vgl. BBodSchV Anhang 2) in Verbindung mit dem Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) in Abhängigkeit von diesen Gefährdungspfaden und der zu betrachtenden Flächennutzung mit Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmewerten unterschiedliche Beurteilungswerte zur Verfügung.

Während nach § 8 BBodSchG Prüfwerte die Grenze markieren, bei deren Überschreiten durch einzelfallbezogene Kontrollen das Vorliegen schädlicher Bodenveränderungen zu überprüfen ist, muss ab den Maßnahmewerten in der Regel von einer solchen Situation ausgegangen werden, so dass Handlungen zur Abwehr negativer Auswirkungen erforderlich werden. Vorsorgewerte dienen demgegenüber dazu, eine Gefahr für die Entstehung schädlicher Bodenveränderungen anzuzeigen.

Nach dem gemeinsamen Runderlass der Ministerien für Städtebau und Umwelt des Landes NRW (Altlastenerlass) stellen die Prüfwerte der BBodSchV im Rahmen der

Bauleitplanung im schlechtesten Fall eine Gefahrenschwelle dar. Da demnach bei einer Unterschreitung die Anforderung des Baugesetzbuchs an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse (§ 1 Abs. 6.1 BauGB) am ehesten als erfüllt angesehen werden kann (vgl. MSWKS/MUNLV, 2005, S. 7), werden im Weiteren die Prüfwerte als Beurteilungsgrundlage verwendet.

Hinsichtlich der bei der Auswahl der Prüfwerte zu berücksichtigenden Flächennutzung ist nach § 4 Abs. 6 BBodSchV von Bedeutung, dass von der vorherrschenden Nutzung abweichende empfindlichere Teilflächen nach den für die tatsächliche Nutzung jeweils festgesetzten Maßstäben zu bewerten sind. Aus diesem Grund muss bei der im vorliegenden Zusammenhang relevanten Wohnnutzung berücksichtigt werden, dass potenzielle Wohngärten sowohl als Kinderspielflächen, als auch als Nutzgarten verwendet werden können. Insofern sind nicht nur die Prüfwerte für Wohngebiete in die nähere Betrachtung zu ziehen, sondern auch die deutlich niedrigeren Werte für Kinderspielflächen bzw. für den Wirkungspfad Boden-Pflanze.

Vor diesem Hintergrund sollte ohne eine genaue Kenntnis der tatsächlichen Verortung einzelner Teilnutzungen bei der Beurteilung der Flächeneignung für eine Wohnnutzung der jeweils sensibelste ausgewiesene Prüfwert der aufgeführten Alternativen zugrunde gelegt werden (vgl. LANUV, 2007, S. 71 ff. / MSWKS/MUNLV, 2005, S. 7 f.).

Eine derartige Vorgehensweise erscheint auch vor dem Hintergrund sinnvoll, dass die tatsächliche Belastungssituation unter ausschließlicher Nutzung der Bodenbelastungskarte tendenziell eher unterschätzt wird, da, wie eingangs dargestellt, die Beeinträchtigung durch Altablagerungen und Altstandorte nicht berücksichtigt wird.

Insgesamt ergeben sich somit für die zu betrachtenden Stoffe als Beurteilungsgrundlage für die Eignung einer Fläche zur Wohnnutzung die in der folgenden Tabelle 4-1 dargestellten Prüfwerte (vgl. LANUV, 2008, S. 17).

**Tab. 4-1: Prüfwerte der BBodSchV und ausgewählter Hintergrundwerte für NRW**

Stoff	Arsen (As)	Blei (Pb)	Benzo(a)pyren	Cadmium
<b>Prüfwert</b>	25 mg/kg*	200 mg/kg*	1 mg/kg**	2 mg/kg***
<b>HGW 1<sup>1</sup></b>	12,8 mg/kg	79 mg/kg	0,4 mg/kg	0,69 mg/kg
<b>HGW 2<sup>2</sup></b>	8,0 mg/kg	72 mg/kg	0,19 mg/kg	0,8 mg/kg
<b>HGW 3<sup>2</sup></b>	3,0 mg/kg	49 mg/kg	0,12 mg/kg	0,5 mg/kg
*	Prüfwert für Kinderspielflächen für Prüfpfad Boden-Mensch (Direktkontakt) (BBodSchV, Anhang 2, Abs. 1.3)			
**	Prüfwert für Ackerbau und Nutzgärten für Prüfpfad Boden – Nutzpflanze (Pflanzenqualität) (BBodSchV, Anhang 2, Abs. 2.2)			
***	Integrierter Prüfwert Haus und Kleingärten für Kinderspielflächen und Anbau von Nahrungspflanzen (BBodSchV, Anhang 2, Abs. 1.3)			
1	Hintergrundwerte (HGW) für Oberböden in NRW für die Gebietstypenklasse I (Ballungskern), Nutzung Garten, 50. Perzentil (vgl. LUA, 2003)			
2	Hintergrundwerte (HGW) für Oberböden in NRW für die Gebietstypenklasse II (Ballungsrandzone / solitäre Verdichtungsräume), Nutzung Garten, 50. Perzentil (vgl. LUA, 2003)			
3	Hintergrundwerte (HGW) für Oberböden in NRW für die Gebietstypenklasse III (überwiegend ländlich), Nutzung Garten, 50. Perzentil (vgl. LUA, 2003)			

Bis zu diesen Prüfwerten kann entsprechend der dargelegten Ausführungen von einer Eignung der Flächen für die Nutzung Wohnen ausgegangen werden, ohne dass durch den Boden verursachte negative Auswirkungen auf die Gesundheit zu erwarten sind. Oberhalb dieser Werte kann ohne eine nähere Prüfung und ggf. die Veranlassung von Maßnahmen eine gesunde Wohnnutzung nicht mit Sicherheit gewährleistet werden.

Vor dem Hintergrund, dass Planung über die reine Gefahrenabwehr hinausgehen sollte, kann es dem Altlastenerlass entsprechend jedoch sinnvoll sein, auch auf lediglich wenig belasteten Flächen keine sensiblen Nutzungen zu etablieren, sofern alternative Flächen zur Verfügung stehen. Demnach sollte eine möglichst weitgehende Unterschreitung der Prüfwerte in der Planung Berücksichtigung finden (vgl. MSWKS/MUNLV, 2005, S. 7). Entsprechend wurden für alle betrachteten Schadstoffe die Daten für die weitere Bearbeitung so modelliert, dass bis zu dem in Tabelle 4-1 dargestellten Prüfwert mit steigendem Schadstoffgehalt eine kontinuierliche Abnahme der Eignung berechnet wird. Ab dem jeweiligen Prüfwert wird die Eignung für die Wohnnutzung mit dem Wert Null angegeben.

Im Anschluss an die erste Modellierung zeigte sich, dass eine bei dem Wert 0 mg/kg beginnende kontinuierliche Abnahme der Eignung zu sehr restriktiven Eignungskarten

führt, durch welche die reale Situation zudem nicht in dem erforderlichen Maße widergespiegelt wird. Auch wenn eine möglichst weitgehende Unterschreitung der Prüfwerte als sinnvoll angesehen werden kann, lassen sich unter Berücksichtigung des geogenen Grundgehalts eines Bodens, der Bodennutzung und der Gebietsstruktur selten Werte von 0 mg/kg beobachten. Von Bedeutung ist vor diesem Hintergrund somit die Modellierung einer Obergrenze, bis zu der eine Wohnnutzung als verhältnismäßig unkritisch anzusehen ist, d. h. ab der die Transformationsfunktion zu sinken beginnt (vgl. Kap 3.1.2).

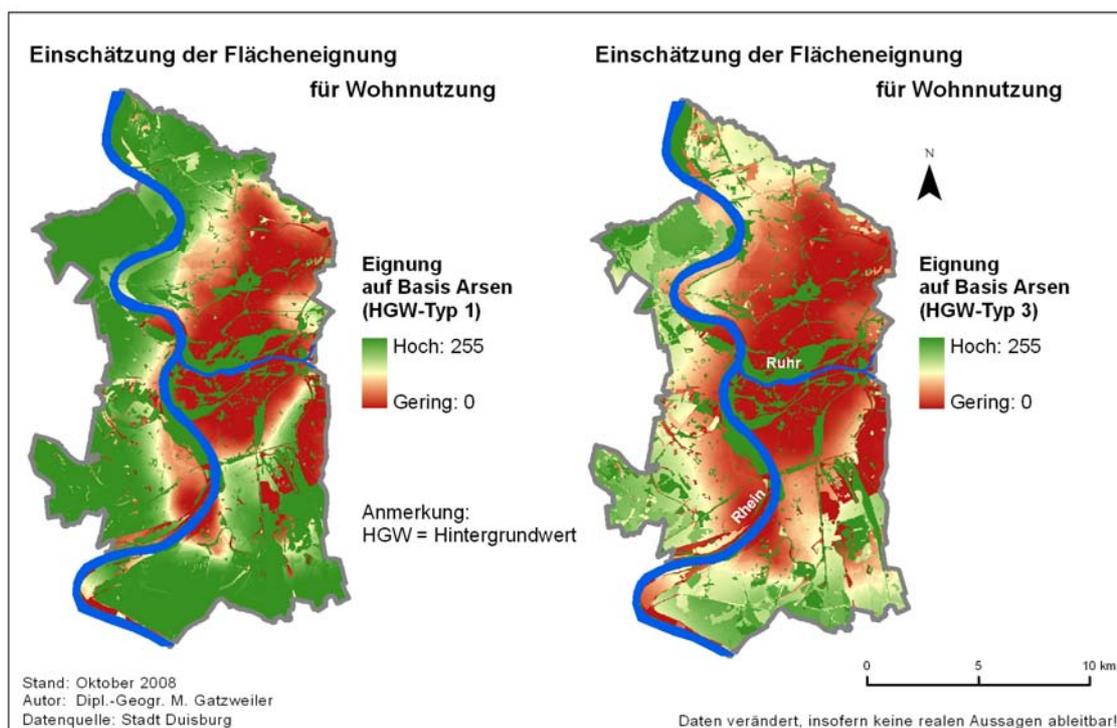
Aus diesem Grund wurden für die relevanten Stoffe Hintergrundwerte (HGW) für die Oberböden in NRW und im Ruhrgebiet recherchiert (vgl. LUA, 2003 / LANUV, 2008). Die Hintergrundwerte geben dabei unter Berücksichtigung der geogenen Grundgehalte eines Bodens und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge in den Böden allgemein bzw. regionspezifisch repräsentative Stoffkonzentrationen in Oberböden an (vgl. LUA, 2003, S. 2). Für weite Teile des Ruhrgebiets wurden für bestimmte Stoffe und Gebietstypen jedoch bereits Hintergrundwerte ermittelt, die über den Prüfwerten der BBodSchV liegen (vgl. LANUV, 2008, S. 26). Dieser Aspekt ist von außerordentlich hoher Bedeutung insbesondere auch für die Interpretation der Bodenbelastungskarten der Stadt Duisburg, im vorliegenden Zusammenhang können diese Werte allerdings nicht genutzt werden. Stattdessen wurden Hintergrundwerte einbezogen, die repräsentative Aussagen für das gesamte Bundesland NRW treffen. In Abhängigkeit von der Bodennutzung und der Gebietstruktur zeigen sich bei der Betrachtung der HGW deutlich unterschiedliche Ausprägungen (vgl. LUA, 2003).

Tabelle 4-1 enthält für die im Rahmen der vorliegenden Fragestellung relevante Bodennutzung „Garten“ die Medianwerte (50. Perzentil) der stoffspezifischen HGW für Ballungsgebiete (HGW 1), Ballungsrandzonen (HGW 2) sowie eine überwiegend ländlich geprägte Gebietsstruktur (HGW 3) (vgl. LUA, 2003, S. 14, 16).

Im vorliegenden Fall wurden den weiteren Arbeitsschritten die Hintergrundwerte für Ballungsgebiete zugrunde gelegt. Ausdrücklich sei aber darauf hingewiesen, dass auch die Werte der anderen Gebietstypenklassen, ggf. in Abhängigkeit von den Gegebenheiten der einzelnen Stadtbezirke, oder vollständig andere Werte wie beispielsweise die jeweiligen Vorsorgewerte der BBodSchV hätten genutzt werden können. Da die jeweiligen Werteausprägungen z. T. deutliche Unterschiede aufweisen, lassen sich im Anschluss an die jeweilige Modellierung der Transformationsfunktion auch entsprechende Auswirkungen auf die Eignungskarten erwarten. Abbildung 4-2 zeigt für den Stoff Ar-

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

sen gegenüberstellend die unter Nutzung der Hintergrundwerte für Ballungsgebiete (links) sowie überwiegend ländlich geprägte Räume (rechts) erstellten Eignungskarten. Erwartungsgemäß ergeben sich je nach zugrunde liegendem Hintergrundwert erhebliche Differenzen hinsichtlich der Beurteilung einzelner Flächen für die Nutzung Wohnen.



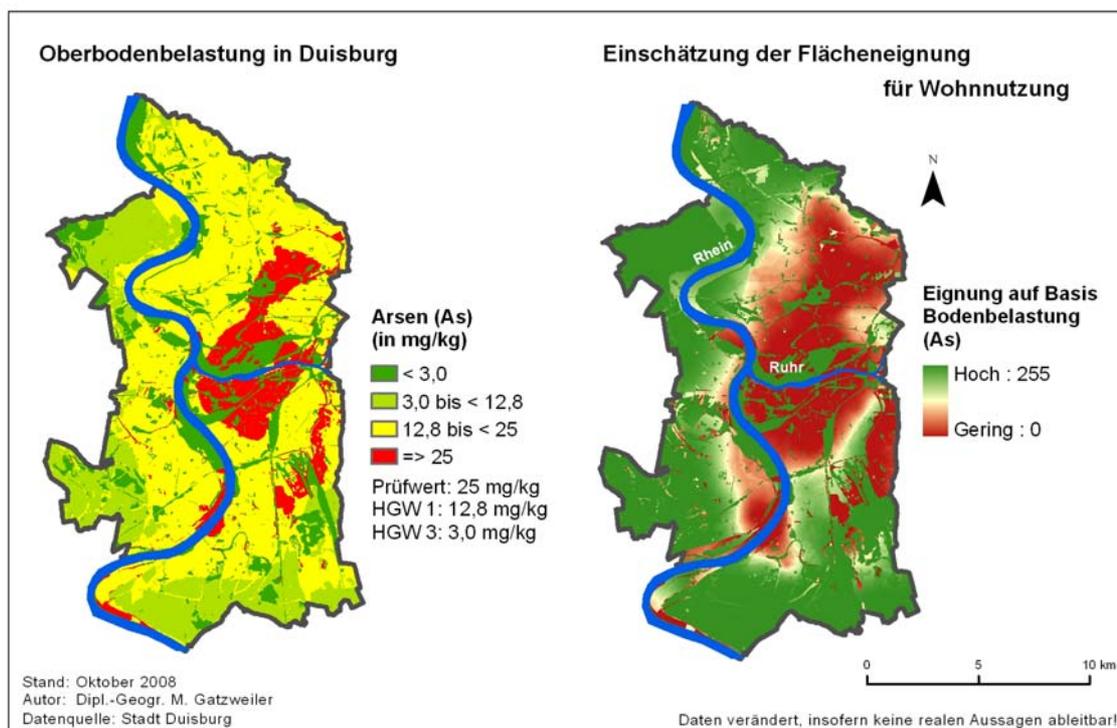
**Abb. 4-2: Eignungskarten auf Basis Arsen: Gegenüberstellung HGW 1 und HGW 3**

An dieser Stelle zeigt sich exemplarisch anhand des Beispiels arsenspezifischer Oberbodenbelastungen, dass die im Rahmen der Datenmodellierung getroffenen zielgerichteten Annahmen in vielen Fällen in hohem Maße bedeutend sind für die in die weiteren Arbeitsschritte einfließenden Eingangsdaten.

Zur Berechnung der Eignungskarten wurden zunächst die für den Innen- und den Außenbereich vorliegenden Daten der Bodenbelastungskarten stoffspezifisch zusammengeführt, reklassifiziert und im Hinblick auf die Anforderungen an Ausmaß und Auflösung des Datensatzes aufbereitet. Im Anschluss wurden die bearbeiteten Daten unter Nutzung einer ASCII-Datei in die Software IDRISI importiert. Da bei einer derartigen Form des Exports grundsätzlich das räumliche Referenzsystem verloren geht, mussten die Daten vor der Weiterbearbeitung zunächst wieder referenziert werden. Unter Anwendung des Fuzzy-Tools wurde für die Berechnung der standardisierten Eignungskarten eine S-förmige Transformationsfunktion genutzt (vgl. Kap.3.1.2), die bis zu dem

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

zugrunde gelegten HGW eine vollständige Eignung (255) und ab dem entsprechenden Prüfwert eine Eignung von 0 berechnet. Die Sigmoidal-Funktion wurde einer linearen Funktion vorgezogen, da auf diese Weise an den Extrema ein „weicherer“ Übergang erzeugt wird (vgl. Abb. 3-3 I). Zur vergleichenden Darstellung der Eingangskarten und der entsprechenden standardisierten Eignungskarten wurden die Daten unter Nutzung eines ASCII-Files nach ArcGIS exportiert, referenziert und entsprechend aufbereitet. Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils gegenüberstellend sowohl die Eingangsdaten (klassifiziert nach Prüfwert, Hintergrundwert 1 und Hintergrundwert 3) als auch die standardisierten Eignungskarten, die im weiteren Verlauf in die Entscheidungsfindung einbezogen werden.



**Abb. 4-3: Oberbodenbelastung (Arsen): Eingangsdaten und Eignungskarte**

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

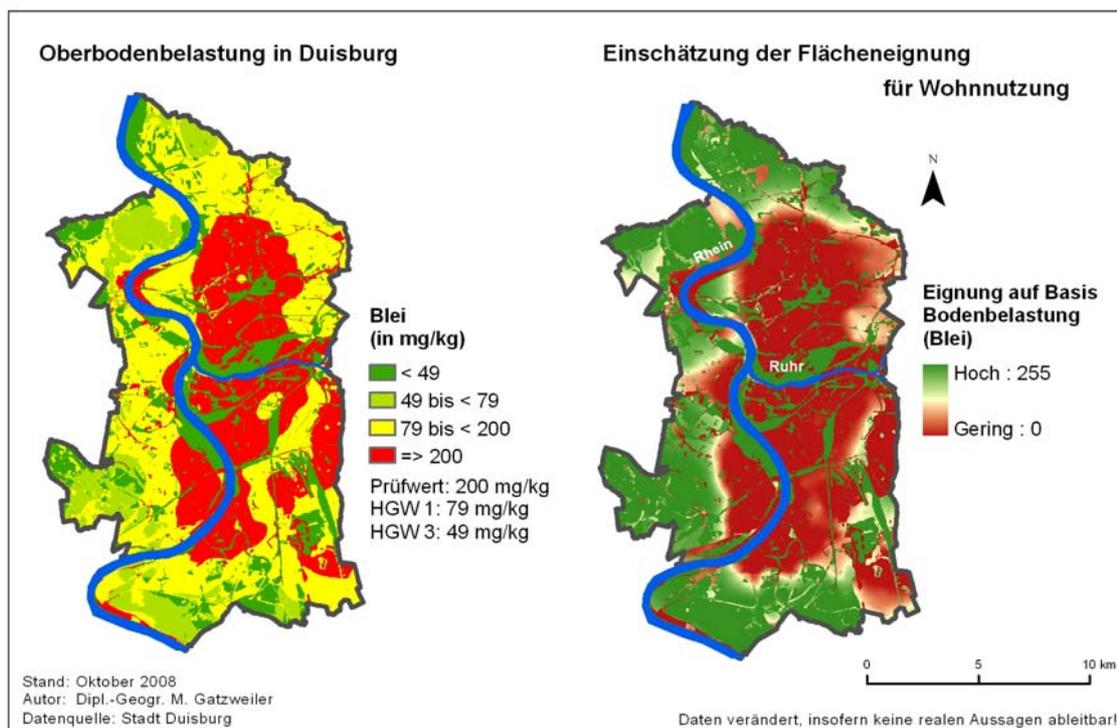


Abb. 4-4: Oberbodenbelastung (Blei): Eingangsdaten und Eignungskarte

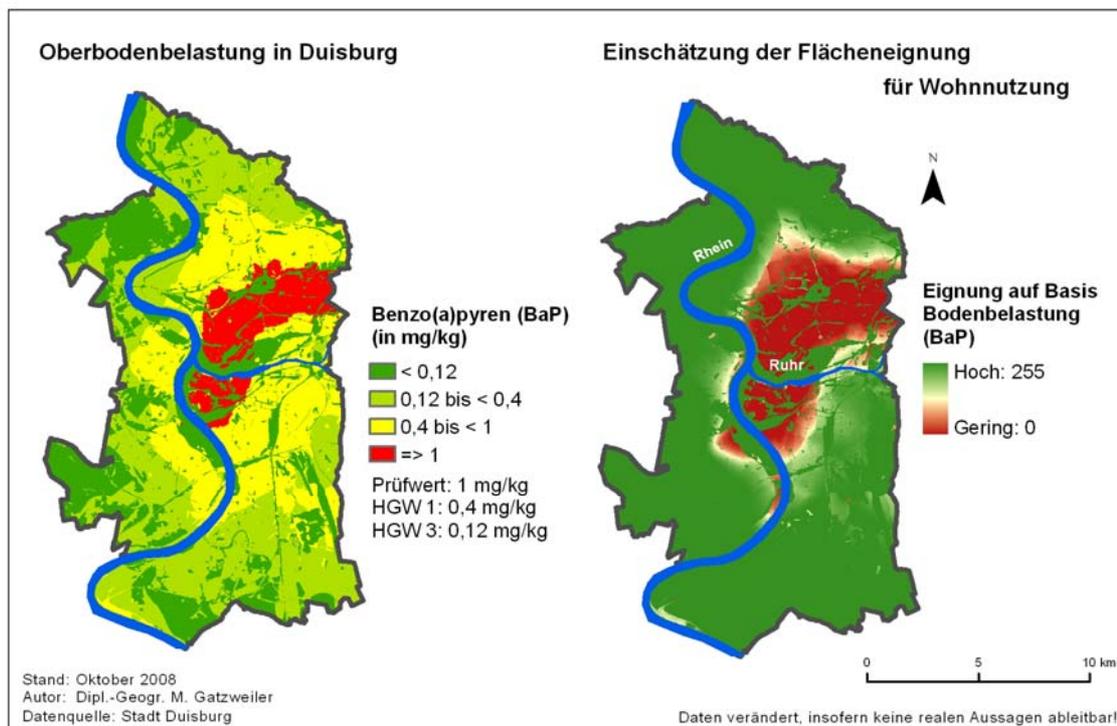
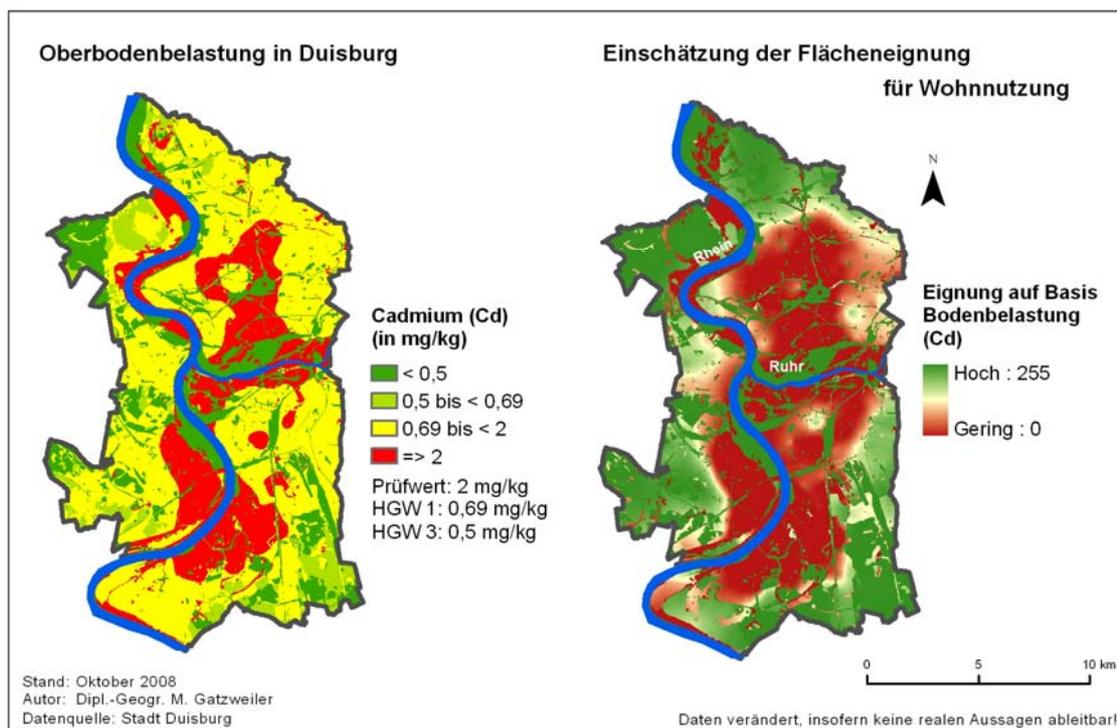


Abb. 4-5: Oberbodenbelastung (BaP): Eingangsdaten und Eignungskarte



**Abb. 4-6: Oberbodenbelastung (Cadmium): Eingangsdaten und Eignungskarte**

Bei der Betrachtung der Karten zeigt sich, dass in allen vier den weiteren Analysen zugrunde gelegten Fällen insbesondere im rechtsrheinischen Bereich des Stadtgebiets mehr oder weniger großräumige Überschreitungen des jeweiligen Prüfwerts berechnet wurden. Die für die Modellierung relevanten Hintergrundwerte für Gartennutzungen in Ballungskernen in NRW (HGW-Typ 1) werden für fast alle betrachteten Schadstoffe nahezu im vollständigen Untersuchungsgebiet in mehr oder weniger hohem Maße überschritten. Lediglich in den Randbereichen des Untersuchungsgebiets zeigen sich großräumigere Unterschreitungen. Eine Ausnahme bildet der Stoff Benzo(a)pyren für den für deutlich größere Teile des Stadtgebiets eine Unterschreitung des Hintergrundwerts vorliegt.

Entsprechend sind vor allem in den rechtsrheinischen Gebieten zumeist sehr niedrige Flächeneignungen für eine potenzielle Wohnnutzung zu beobachten, für weite Teile muss auf Basis der gewählten Modellierung eine Eignung abgesprochen werden. Demgegenüber sind vor allem in den nördlichen, westlichen und südlichen Randbereichen oft deutlich höhere Eignungswerte zu verfolgen.

##### **4.1.1.2 Schutz vor verkehrlichen Schallimmissionen**

Bei der Betrachtung umweltbezogener Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen kommt dem Themenfeld Lärm eine weitere wesentliche Bedeutung zu.

Vor allem in ausgedehnten Bereichen stark verdichteter Ballungsräume führt eine nicht selten große räumliche Nähe zwischen zahlreichen Lärmemitteln und sensiblen Nutzungen zu erheblichen Belastungen für einen großen Teil der Bevölkerung. Dabei spielen physiologische und psychische Auswirkungen aufgrund alltäglich hoher Lärmwerte bezogen auf die Quantität der betroffenen Personen eine größere Rolle als akute Gehörschäden, die durch ggf. extreme aber verhältnismäßig kurzfristige Lautstärken verursacht wurden.

Als wesentliche im Rahmen der Stadtplanung relevante Lärmquellen sind dabei insbesondere der Straßen-, Schienen- und Luftverkehr sowie Industrie und Gewerbe anzusehen (vgl. Kaule, 2002, S. 56 ff. / MUNLV, 2007a, S. 86 ff. / Sukopp/Wittig, 1998, S. 95 ff.).

Für die Beurteilung der Lärmbelastung werden je nach konkretem auf die Anwendung für spezielle Lärmarten ausgerichtetem Regelwerk unterschiedliche Schwellenwerte angesetzt. Im Rahmen städtebaulicher Planungen wie der hier relevanten Ausweisung neuer Wohngebiete stellen die durch die DIN 18005 aufgezeigten Orientierungswerte die zentrale Beurteilungsgrundlage für Verkehrs- und Gewerbelärm dar. Demnach wäre die Einhaltung bzw. Unterschreitung eines Schallimmissionspegels (SIP) von 50 dB(A) tags und 40 dB(A) nachts ein ausdrücklich wünschenswertes planerisches Ziel (vgl. Kuschnerus, 2005, S. 184 ff.).<sup>11</sup>

Analog dem im Rahmen der Modellierung der bodenspezifischen Eignungskarten vorgestellten Vorgehen wäre somit eine diesen Werten entsprechende Lärmbelastung als Grenze anzusehen, ab der die Realisierung einer Wohnnutzung einer näheren Auseinandersetzung mit der Lärmthematik bedarf. Bei einer Überschreitung wäre eine Eignung somit erst gegeben, wenn Vorkehrungen zur Abwendung negativer Auswirkungen beispielsweise in Form von aktiven oder passiven Schallschutzmaßnahmen ergriffen werden. Insofern wäre ab diesem Wert eine Eignung von Null zu modellieren. Im Sinne einer planerisch möglichst weiten Unterschreitung der Orientierungswerte würde eine

---

<sup>11</sup> Im Rahmen der nicht zuletzt auf die Bauleitplanung ausgerichteten Regelwerke werden die Nutzungen entsprechend der Baunutzungsverordnung (BauNVO) unterschieden. Innerhalb dieser Arbeit wird im Falle einer Unterscheidung von Allgemeinem und Reinen Wohngebiet unter Wohnnutzung das Reine Wohngebiet verstanden und somit auf die sensiblere Nutzung und den entsprechend höheren Schutzbedarf abgestellt.

Eignungskarte durch eine bis zu diesem Wert abnehmende Eignung modelliert. Dabei sollte jedoch ähnlich wie beim Thema Boden zusätzlich berücksichtigt werden, dass ein Wert von 0 dB(A) in der Realität kaum zu erreichen ist und zudem im unteren Wertebereich negative Auswirkungen auf die Gesundheit nicht zu erwarten bzw. kaum zu differenzieren sind. Aus diesem Grund sollte ein als gesundheitlich unbedenklich eingestuftes Sockelwert in einer zu definierenden Höhe in die Modellierung einbezogen werden. Ein dem Pegel eines leichten Blätterrauschens entsprechender Wert von 30 dB(A) nachts bzw. einer Flüstersprache entsprechender Pegel von 40 dB(A) tags kann möglicherweise in dieser Hinsicht als akzeptabel angesehen werden und als Grenze maximaler Eignung in die Modellierung einfließen (vgl. Kuschnerus, 2005, S. 186).

Insgesamt ergäbe sich bei einer derartigen Herangehensweise somit bis zu einem Wert von 40 dB(A) tags bzw. 30 dB(A) nachts eine maximale Eignung, bis zu einem Wert von 50 dB(A) tags bzw. 40 dB(A) nachts eine kontinuierlich sinkende Eignung und ab diesen Werten eine nicht mehr vorhandene Eignung von Null (vgl. hierzu auch Joerin/Theriault/Musy, 2001, S. 160 ff.).

Vor dem Hintergrund, dass die EU insbesondere von den angeführten Emittenten verursachte Geräusche als eines der größten Umweltprobleme in Europa ansieht, wurde im Jahr 2002 eine Richtlinie erlassen, die diesem als Umgebungslärm bezeichneten Phänomen begegnet. Ziel ist zunächst die Erstellung einer flächendeckenden vergleichbaren Datengrundlage in Form von Lärmkarten, im Weiteren die Anfertigung von Lärmaktionsplänen um bei national zu definierenden Überschreitungen von Schwellenwerten negative Auswirkungen zu vermindern.

Duisburg als Ballungsraum mit mehr als 250.000 Einwohnern gehört zu den Städten, für die bereits in der ersten Stufe der Umsetzung der Richtlinie die erforderlichen Lärmkartierungen durchzuführen waren (vgl. RL 2002/49/EG, Art. 7 / BImSchG, § 47c). Die konkreten Anforderungen an die Kartierung des Umgebungslärms können dabei der 34. Verordnung zur Durchführung des BImSchG entnommen werden (vgl. 34. BImSchV).

In der vorliegenden Arbeit werden auf dieser Verordnung beruhende Daten (Bezugsjahr 2006) für die von Straßenverkehr ausgehenden Lärmeinwirkungen berücksichtigt, wobei einige erhebliche Einschränkungen im Hinblick auf die Nutzbarkeit der verfügbaren Daten anzuführen sind.

So sind entsprechend der EU-RL hinsichtlich des Straßenverkehrs lediglich Straßen mit einem Verkehrsaufkommen von mehr als 6 Mio. Kfz pro Jahr in die Berechnungen der Lärmkarten eingeflossen.

Auch wenn auf diese Weise die in einigen Bereichen des Stadtgebiets vorliegenden erheblichen Belastungen in die weiteren Untersuchungen einbezogen werden können, ist bei der Analyse der Ergebniskarten unbedingt zu beachten, dass die potenzielle Ausweitung einer hohen Eignung im Umfeld nicht berücksichtigter Straßen liegender Gebiete für Wohnbebauung in vielen Fällen angezweifelt werden muss.

In diesem Zusammenhang zeigt sich sehr eindrücklich die hohe Bedeutung einer umfassenden Ermittlung aller relevanten Daten für eine verlässliche Nutzbarkeit der Ergebniskarten.

Als weitere Einschränkung muss betrachtet werden, dass lediglich Daten zur Verfügung stehen, die die Lärmbelastungen in 5 dB(A) Schritten entsprechend der 34. BImSchV darstellen. Eine kontinuierliche Modellierung der Eignungskarten ist vor diesem Hintergrund nicht möglich. Zudem wurden nur Lärmwerte von über 55 dB(A) tags und 50 dB(A) nachts berechnet. Unterhalb dieser Schwelle liegen keine Schallimmissionswerte vor. Eine dem eingangs dargestellten idealtypischen Vorgehen entsprechende auf die Orientierungswerte der für den Städtebau zentralen Beurteilungsgrundlage für Schallimmissionen (DIN 18005) ausgerichtete Datenmodellierung ist somit angesichts der verfügbaren Datengrundlage nicht sinnvoll umsetzbar.

Trotz der beschriebenen Einschränkungen der verfügbaren Daten soll vor dem Hintergrund der hohen Bedeutung dieses Themenfeldes jedoch auf einen Einbezug nicht verzichtet werden.

Während in der Praxis entweder zusätzliche (kostenintensiven) Datengrundlagen erzeugt werden oder unter Berücksichtigung der Verkehrszahlen und möglichst ortsbezogener lärmrelevanter Erfahrungswerte eine Abschätzung „zur sicheren Seite“ im Sinne einer Modellierung von „Worst-Case“-Szenarien erfolgen müsste, wird im Rahmen dieser Arbeit vereinfachend unterstellt, dass die im Umfeld der nicht berücksichtigten Verkehrswege liegenden Gebiete bezogen auf die Lärmwerte in vollem Umfang für Wohnnutzung geeignet sind.

Für die Modellierung der Eignungskarten wird aus den genannten Gründen nicht auf die Orientierungswerte der DIN 18005, sondern auf die in NRW für die angesprochene Aktionsplanung festgelegten Auslösewerte von 70 dB(A) tags und 60 dB(A) nachts zu-

rückgegriffen (vgl. MUNLV, 2008, S. 1 f.), deren Erreichung tendenziell als Schwelle zur Unzumutbarkeit angesehen werden kann (vgl. Kuschnerus, 2005, S. 189 ff.).

Abweichungen in der Interpretierbarkeit der SIP, die sich aus unterschiedlichen Berechnungsverfahren zwischen EU-Vorgaben und den bestehenden nationalen Regelwerken ergeben, werden im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls vereinfachend unberücksichtigt gelassen.

Ab den angeführten SIP von 70 dB(A) tags und 60 dB(A) nachts wäre demnach für die Realisierung einer Wohnbebauung die Prüfung der konkreten Notwendigkeit zur Umsetzung von Lärmschutzmaßnahmen erforderlich und somit eine Eignung von Null zu unterstellen. Bis zu dieser Schwelle wird von einer sinkenden Eignung ausgegangen, wobei, auch wenn keine Werte kleiner 55 dB(A) bzw. 50 dB(A) in den Daten enthalten sind, der im Vorfeld angeführte Sockelwert in die Modellierung einbezogen wird. Insgesamt wird zur Berechnung der standardisierten Eignungskarten erneut eine S-förmige Transformationsfunktion genutzt, die für die Tageswerte von 40 dB(A) bis 70 dB(A) und für die Nachtwerte von 30 dB(A) bis 60 dB(A) kontinuierlich sinkt (vgl. Abb. 3-3I).

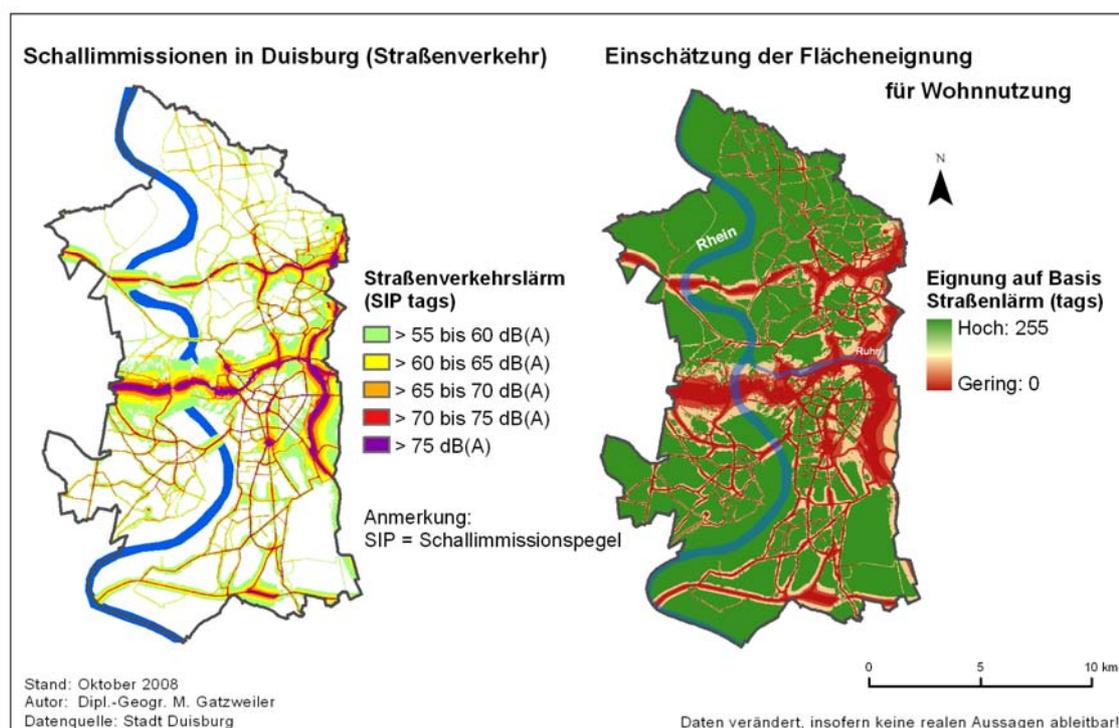
Beim Vergleich der den beiden dargestellten Möglichkeiten zur Datenmodellierung zugrunde liegenden Schwellenwerte lassen sich erhebliche Unterschiede der lärmbezogenen Eignungskarten erahnen. Durch die vorangegangenen Ausführungen wird deutlich offenbar, dass neben der Qualität der verwendeten Daten auch die Wahl der für die weitere Modellierung genutzten Beurteilungsgrundlage ausschlaggebend ist für die Aussagekraft der letztlich erzeugten Ergebnisse. Letzteres kann im Übrigen einen Bereich darstellen, über den, ebenso wie bei der Festlegung der Schwellenwerte im Themenfeld Boden, nicht zwingend Konsens zwischen den am Entscheidungsprozess Beteiligten bestehen muss.

Beide Aspekte, Datenqualität und Art der Datenmodellierung, bedürfen somit für die Einschätzung der Güte der Endaussagen einer transparenten Darstellung.

Um die lärmspezifische Kriterienkarte zu erzeugen, wurden die als Vektordaten vorliegenden Lärmbelastungskarten mit der Software ArcGIS in einen dem Erfordernis an Ausmaß und Auflösung entsprechenden Rasterdatensatz überführt. Im Anschluss wurden diese Daten über eine ASCII-Datei in die Software IDRISI importiert und erneut mit einem räumlichen Referenzsystem versehen. Die auf diese Weise in IDRISI vorliegenden Lärmbelastungsdaten wurden unter Anwendung des Fuzzy-Tools in der be-

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

schriebenen Weise modelliert. Die lediglich in 5 dB(A)-Schritten vorliegenden Daten wurden dabei jeweils mit ihrer Untergrenze berücksichtigt, d. h. die Klasse von beispielsweise größer 55 dB(A) und kleiner bzw. gleich 60 dB(A) floss mit 55 dB(A) in die weitere Bearbeitung ein. Andere Modellierungen, wie z. B. die Berücksichtigung der Klassenmitte oder der Klassenobergrenze, wären ebenso denkbar gewesen. Um die standardisierte Eignungskarte in einem angemessenen Layout darstellen zu können, wurde diese mittels eines ASCII-Files wieder nach ArcGIS exportiert und erneut referenziert.



**Abb. 4-7: Verkehrliche Schallimmissionen: Eingangsdaten und Eignungskarte**

Abbildung 4-7 zeigt erwartungsgemäß, dass die für eine Wohnbebauung ungeeigneten Flächen in enger räumlicher Nähe zu den stark befahrenen Straßen liegen. Da die beiden obersten Kategorien der Lärmimmissionskarte (70 dB(A) und 75 dB(A)) mit einer Eignung von 0 modelliert wurden, erscheint die Eignungskarte weniger feingliedrig. Dennoch lässt sich an beiden Karten beobachten, dass die Daten lediglich in diskreter Form vorliegen. Wie im Vorfeld angeführt, sind großräumige Flächen mit maximaler Eignung (255) versehen. Auch wenn im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine derartige Beurteilung genutzt wird, darf nicht übersehen werden, dass diese positive Einschätzung zunächst auf den Mangel an flächendeckenden Daten zurückzuführen ist. Ob eine derartige Modellierung tatsächlich als angemessenes Abbild der Realität angesehen werden

kann, muss zumindest in diesem Ausmaß bezweifelt werden. Dennoch soll vereinfachend mit diesen Daten weitergearbeitet werden.

Obwohl in den vorangegangenen Ausführungen die durch den Straßenverkehr verursachten nächtlichen Belastungen behandelt wurden, müssen diese aus den weiteren Analysen ausgeblendet werden. Trotz zahlreicher Versuche ist es im Zuge der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht gelungen, den verfügbaren Datensatz in die erforderliche Form zu überführen.<sup>12</sup>

Die vom Luftverkehr ausgehenden Lärmemissionen spielen im Untersuchungsgebiet eine eher untergeordnete Rolle und werden deswegen nicht weiter betrachtet. Der Schienenverkehr muss aus Gründen der Datenverfügbarkeit, trotz seiner in Teilbereichen des Stadtgebiets erheblichen Bedeutung, ebenfalls aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden. Die Vorgehensweise wäre allerdings der in diesem Abschnitt dargestellten vergleichbar. Da auf die im Rahmen der Umgebungslärm-Richtlinie zu berechnenden Daten zu durch Industrie- und Gewerbe verursachten Lärmbelastungen nicht zurückgegriffen werden konnte, werden u. a. diese Emissionen auf anderem Wege in die weiteren Analysen einbezogen. Im nächsten Kapitel wird dieses Thema im Mittelpunkt des Interesses stehen.

---

<sup>12</sup> Obwohl die Software über sehr lange Zeit Berechnungen durchgeführt hat, sind keine verwertbaren Ergebnisse entstanden. Trotz verschiedener Bemühungen konnte die Ursache hierfür nicht ermittelt werden. Die identische Vorgehensweise führte für die Tageswerte problemlos zu nutzbaren Ergebnissen.

##### **4.1.1.3 Schutz vor gewerblichen Immissionen**

Bei zahlreichen Industrie- und Gewerbebetrieben sind emissionsbedingte Auswirkungen auf eine mehr oder weniger große Umgebung selbst dann nicht vollständig zu vermeiden, wenn die betriebenen Anlagen auch hinsichtlich des Emissionsminderungspotenzials dem jeweils aktuellen Stand der Technik entsprechen (vgl. MUNLV, 2007a, S.93 f.). Nach § 50 Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) sind aus diesem Grund für bestimmte Nutzungen vorgesehene Flächen einander so zuzuordnen, dass sowohl schädliche Umwelteinwirkungen als auch von schweren Unfällen ausgehende Auswirkungen u. a. auf Wohngebiete weitestgehend vermieden werden. Einem ausreichenden Abstand zwischen den emittierenden und den zu schützenden sensiblen Nutzungen kommt dabei eine wesentliche Bedeutung zu.

Insbesondere aufgrund dieses Trennungsgrundsatzes wird durch das MUNLV ein zuletzt im Jahr 2007 aktualisierter Erlass bereitgestellt, dessen Ziel die Stärkung eines vorsorgenden Immissionsschutzes in der Planung ist.

Zur Vermeidung schädlicher Umwelteinwirkungen werden durch diesen Erlass vor allem für bestimmte genehmigungsbedürftige Anlagen, d. h. Anlagen, die nach § 4 BImSchG in besonderem Maße geeignet sind schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen (vgl. auch 4. BImSchV), Abstände zwischen diesen in Industrie- bzw. Gewerbegebieten verorteten Anlagen und Wohngebieten definiert. Bei einer Einhaltung der aufgeführten Abstände sind im Allgemeinen bei bestimmungsgemäßem Anlagenbetrieb keine Gefahren, erhebliche Nachteile oder Belästigungen aufgrund von Lärm-, aber auch Luft- oder Geruchsemissionen zu erwarten.

Bei einer mehr als nur geringfügigen Unterschreitung der angegebenen Abstände sollte über eine detaillierte Einzelfallprüfung untersucht werden, ob Gefahren, Nachteile oder Belästigungen zu befürchten sind und welche Schutzmaßnahmen ggf. getroffen werden können (vgl. MUNLV, 2007b, S. 17, 66, 172).<sup>13</sup>

Innerhalb des in der vorliegenden Arbeit zu betrachtenden Untersuchungsgebiets kommt diesem Themenfeld aufgrund einer hohen Anzahl genehmigungsbedürftiger Anlagen eine besondere Bedeutung zu. Insofern wurde für alle zugrunde gelegten Anlagen der Abstand gemäß der Abstandsliste 2007 ermittelt, wobei nicht alle zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit nach dem BImSchG genehmigungspflichtigen Anlagen

---

<sup>13</sup> Eine Unterschreitung der definierten Abstandsempfehlungen ist somit nicht automatisch mit erheblichen negativen Beeinträchtigungen gleichzusetzen. Im Einzelfall kann auch bei einer deutlichen Unterschreitung der Distanzen durch entsprechende zusätzliche Vorkehrungen ein angemessener Schutz erzielt werden.

innerhalb des Duisburger Stadtgebietes recherchiert werden konnten. Aus diesem Grund muss die tatsächliche Eignung in verschiedenen Bereichen des Untersuchungsgebiets als deutlich geringer angesehen werden als durch die erfolgte Modellierung ausgedrückt.

Im Rahmen der Datenmodellierung wurden ausgehend von den erfassten Anlagen, differenziert nach den relevanten Abstandsklassen, Distanzoberflächen berechnet, die im Weiteren als Grundlage für die Eignungskarte genutzt wurden. Sofern der entsprechende anlagenspezifische Abstand erreicht oder überschritten wird, ist die Eignung als optimal anzusehen und die jeweilige Fläche mit dem Wert 255 belegt. Bis zu einem Wert von 70 % des definierten Abstands wurde mittels einer benutzerdefinierten linearen Transformationsfunktion (Fuzzy-Tool der Software IDRISI) eine abnehmende Eignung modelliert, die aufgrund der Geringfügigkeit der Unterschreitung noch keine Einzelfalluntersuchung erforderlich macht. Bei einem Wert von weniger als 70 % der in der Abstandsliste definierten Distanz wird unterstellt, dass die Unterschreitung nicht mehr in einem als geringfügig zu bezeichnenden Ausmaß vorliegt, so dass für die Errichtung einer Wohnbebauung detaillierte Prüfungen und ggf. Schutzmaßnahmen erforderlich sind, die zu einem Eignungswert von Null führen. Dabei muss betont werden, dass die hier genutzte Geringfügigkeitsschwelle keine normative Untermauerung besitzt, sondern als verhältnismäßig freie Annahme innerhalb dieser Arbeit festgesetzt wurde. Berücksichtigt wurde bei der Fixierung dieser Grenze vor allem, dass spätestens ab einer Halbierung des Abstands mit einer erheblichen Zunahme des Lärmpegels gerechnet werden muss. Eine Ausdehnung der Geringfügigkeitsschwelle über den Wert von 30 % hinaus wurde somit vor diesem lärmbezogenen Hintergrund als nicht sinnvoll angesehen. Auch wenn es sich letztlich insbesondere hinsichtlich der anlagenunabhängigen pauschalen Definition dieser Geringfügigkeitsschwelle um eine möglicherweise unzulässige Vereinfachung handelt, wurde im vorliegenden Zusammenhang ein derartiges Vorgehen als akzeptabel angesehen. Im Rahmen einer detaillierteren Betrachtung könnte die Modellierung unter Berücksichtigung zusätzlicher fachlicher Kenntnisse, beispielsweise über eine anlagenspezifische Geringfügigkeitsschwelle, weiter verfeinert werden.

Zusätzlich muss beachtet werden, dass bei der gewählten Herangehensweise lediglich der geringste Abstand zur nächsten Anlage in die Datenmodellierung einbezogen wird. Eine gleichzeitige Verortung innerhalb der Geringfügigkeitsschwelle mehrerer Anlagen

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

würde somit bislang nicht berücksichtigt. Da durch den Abstandserlass das Themenfeld der Summation potenzieller Lärm-, Luft- und/oder Geruchsbelastungen unterschiedlichster Anlagenarten nicht allgemeingültig behandelt werden kann (vgl. Kuschnerus, 2005, S. 216), wird im Weiteren angenommen, dass Gebiete, die den definierten Abstand zu mehreren Anlagen unterschreiten, auch im Falle einer lediglich geringfügigen Unterschreitung einer Einzelfallprüfung bedürfen. Hierzu wurden die entsprechenden Überschneidungsbereiche der abstandsspezifischen Buffer ermittelt, in einen Rasterdatensatz überführt und mit einem Eignungswert von Null belegt.

Die einzelnen Rasterdatensätze wurden schließlich mittels verschiedener Reklassifizierungen und Verschneidungen zu einer Gesamteignungskarte zusammengefügt. In dieser besitzen alle Flächen innerhalb eines Radius von 70 % des jeweils relevanten Abstandswertes einen Eignungswert von Null, alle darüber hinausgehenden aber unterhalb der empfohlenen Distanz liegenden Flächen eine bis auf den Wert von 255 linear ansteigende Eignung und alle außerhalb der Buffer liegenden Flächen pauschal eine maximale Eignung (255). Flächen im Schnittbereich mehrerer Radien weisen unabhängig von der exakten Distanz eine Eignung von Null auf.

Die der Arbeit zugrunde gelegten genehmigungsbedürftigen Anlagen inklusive der entsprechenden Abstandsradien sowie die unter Berücksichtigung der angeführten Vorgehensweise daraus resultierende Eignungskarte sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

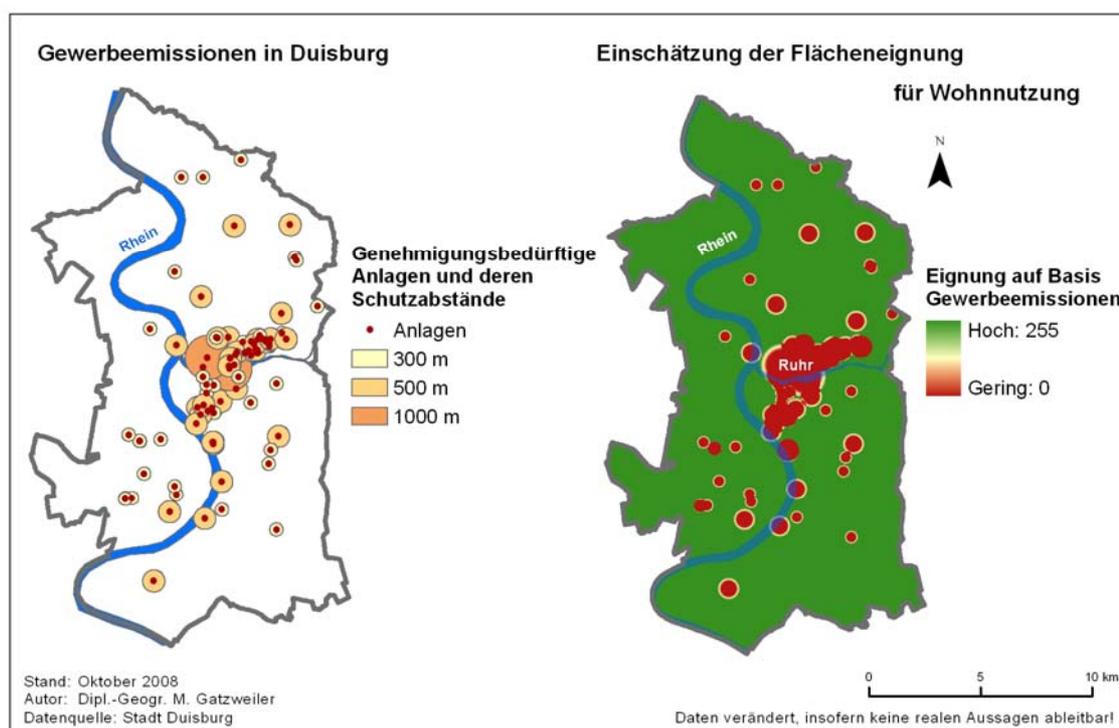


Abb. 4-8: Gewerbeemissionen: Eingangsdaten und Eignungskarte

Bei der Betrachtung der Abbildung 4-8 zeigt sich vor allem im zentralen rechtsrheinischen Bereich des Untersuchungsgebiets eine erhebliche Konzentration genehmigungsbedürftiger Anlagen, die großflächig zu einer zumeist nicht vorhandenen Eignung führt. Darüber hinaus lassen sich zahlreiche nahezu über das gesamte Gebiet verteilte Anlagen beobachten. Da die berücksichtigten Anlagen überwiegend niedrigen Abstandskategorien zuzuordnen sind, ist der prozentual definierte Übergangsbereich zwischen Eignung und Nicht-Eignung häufig sehr klein. Bei höheren Abstandsklassen fällt diese hinsichtlich der Eignungswerte kontinuierlich ausgeprägte Zone deutlich breiter aus.

Der zweite in § 50 BImSchG angesprochene Aspekt, der Schutz sensibler Nutzungen vor von schweren Unfälle verursachten Auswirkungen, wird durch den bisher dargestellten einen bestimmungsgemäßen Anlagenbetrieb zugrunde legenden Abstandserlass nicht gefasst.

Zur planerischen Berücksichtigung der insbesondere auf Artikel 12 der Seveso-II-Richtlinie (vgl. RL 96/82/EG, Art 12. Land-Use-Planning) zurückgehenden Forderung, schwere Unfälle zu verhüten bzw. die Folgen eines solchen Unfalls zu begrenzen, wurde ein zusätzlicher Leitfaden erstellt, der Empfehlungen für Abstände zwischen störfallgefährdeten Anlagen und schutzbedürftigen Nutzungen vorsieht (vgl. SKF/TAA, 2005). Auch wenn eine Berücksichtigung dieses Themenfeldes auch für das betrachtete Untersuchungsgebiet von außerordentlich großer Bedeutung ist, konnte eine Behandlung im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht erfolgen, da die stoff- und mengenbezogenen Abstandsempfehlungen den recherchierten Anlagentypen ohne detailliertes Hintergrundwissen zu den spezifischen Produktionsprozessen nicht fundiert zugeordnet werden konnten. Das grundsätzliche Vorgehen würde dem im Vorfeld beschriebenen allerdings ähneln.

### 4.1.1.4 Schutz vor Luftschadstoffen

Die Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf die Umwelt können vielfältiger Art sein. Die hier im Vordergrund stehenden Auswirkungen auf den Menschen reichen dabei von mehr oder weniger starken Belästigungen, bis zu im schlimmsten Fall ernsthaften Beeinträchtigungen der Gesundheit. Aufgrund der inhalativen Aufnahme gas- oder partikelförmiger Luftschadstoffe sind dabei vor allem Auswirkungen auf die Atemwege zu nennen, daneben können aber auch allergische Reaktionen bis hin zu Krebserkrankungen im Zusammenhang mit Immissionsbelastungen stehen (vgl. Sukopp/Wittig, 1998, S. 84 ff., 92 ff.).

Im Vergleich zu langen Zeiträumen der industriellen Entwicklung hat sich die Luftqualität im Untersuchungsgebiet, ähnlich wie in vielen anderen europäischen urbanen Ballungsräumen, bezogen auf zahlreiche Schadstoffe erheblich verbessert. Dennoch lassen sich auch gegenwärtig noch in bestimmten Bereichen des betrachteten Stadtgebiets für verschiedene Stoffe zum Teil deutliche Grenzwertüberschreitungen feststellen. Die besondere Relevanz immissionsbezogener Gesundheitsbeeinträchtigungen für Duisburg wurde u. a. in humanmedizinischen Untersuchungen innerhalb kleinräumiger durch erhöhte Immissionsbelastungen geprägter Gebiete (Hot Spots) bestätigt (vgl. LUA, 2004).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden im Hinblick auf die Zielsetzung „Schutz vor Luftschadstoffen“ sowohl die spezifische Feinstaubsituation als auch die durch Stickstoffdioxid verursachten Belastungen in die weiteren Untersuchungen einbezogen. Weitere zunächst in der Modellierung berücksichtigten Daten zu Staubbiederschlägen unterschiedlicher Inhaltsstoffe wurden aufgrund nicht unerheblicher Schwierigkeiten im Hinblick auf die relevanten Rückschlüsse und potenzieller Korrelationen zu den Aussagen der Bodenbelastungskarte letztlich aus den weiteren Untersuchungen ausgeblendet.

Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Feinstäube (PM<sub>10</sub>, d. h. Partikel mit einer Größe von ≤ 10 µm) tragen in vielen urbanen Gebieten in hohem Maße zur Immissionsbelastung bei. Als Hauptverursacher sind hierfür vor allem industrielle Nutzungen sowie der (Straßen)Verkehr anzusehen.

Die negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit konnten dabei in verschiedenen Untersuchungen belegt werden. Beide Formen der Luftverunreinigung müssen demnach als in Zusammenhang mit Atemwegs- oder Kreislaufkrankungen stehend gesehen werden, zudem liegen auch Hinweise auf eine allgemeine Erhöhung der

Sterblichkeit vor (vgl. MUNLV, 2007a, S. 42 ff., 50 ff., 64 ff, 68 ff. / Bezirksregierung Düsseldorf, 2008, S. 14 ff. / SRU, 2008, S. 213 ff.).

Vor allem dem Wohnort kommt dabei eine nicht unerhebliche Bedeutung zu. So besteht in Bezug auf die PM10-Belastung ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen einer auf Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen zurückgehenden Sterblichkeit und einem Wohnort im Umkreis von 50 Metern zu einer Hauptverkehrsstraße mit mehr als 10.000 Fahrzeugbewegungen pro Tag (vgl. Bezirksregierung Düsseldorf, 2008, S.16 / LUA, 2005, S. 77).

Aufgrund der besonderen Bedeutung dieses Themenfelds für das Untersuchungsgebiet sowie mehrere östlich angrenzende Nachbarstädte wurde in jüngster Vergangenheit der Luftreinhalteplan Ruhrgebiet (West) aufgestellt. In diesem Rahmen wurden auch für bestimmte Straßenabschnitte innerhalb des in der vorliegenden Arbeit relevanten Untersuchungsgebiets Belastungskarten für NO<sub>2</sub> und PM10 berechnet. Als Grundlagen dienten Daten der großräumigen regionalen Hintergrundbelastung, der urbanen Zusatzbelastung sowie der Belastungen, die an den jeweiligen Straßenabschnitten durch den lokalen Kraftfahrzeugverkehr verursacht werden (zum Modellierungsverfahren vgl. Bezirksregierung Düsseldorf, 2008, S. 26 ff.).

Einschränkend muss angeführt werden, dass der Beitrag des lokalen Straßenverkehrs nur für zu beiden Seiten durch Randbebauung geprägte Straßenabschnitte berechnet werden konnte. Auf diese Weise sind jedoch selbst für eine Vielzahl stark befahrener Straßenabschnitte, wie z. B. große Teile des Autobahnnetzes, mit den vorliegenden Daten keine Aussagen über die lokalen straßenabschnittsbezogenen Belastungen möglich.

Sofern die aus allen drei Grundlagen bestehenden relativ präzise berechneten Gesamtbelastungsdaten vorlagen, wurden diese den weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt. Dabei wurden die straßenbezogenen Liniendatensätze stark vereinfachend auf einen homogenen Buffer von 50 Metern zu beiden Seiten der Straßenmitte bezogen. Kleineräumige sich aus der tatsächlich vorhandenen lokalen Situation (z. B. der Gebäudestellung und den Strömungsverhältnissen) ergebende Differenzierungen der Belastung werden auf diese Weise allerdings unberücksichtigt gelassen.

Für die restlichen Bereiche des Stadtgebiets musste aufgrund mangelnder genauere Daten auf die im Rahmen des Luftreinhalteplans genutzten in einer räumlichen Auflösung von 1 km vorliegenden Daten zur summierten regionalen und urbanen Hintergrundbelastung zurückgegriffen werden (vgl. Bezirksregierung Düsseldorf, 2008, S. 77).

Eine wesentliche Beurteilungsgrundlage für PM<sub>10</sub> ist die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen ein Tagesmittelwert von 50 µg/m<sup>3</sup> überschritten wird (vgl. 22.BImSchV, § 4). Sofern der Jahresmittelwert für PM<sub>10</sub> 30 µg/m<sup>3</sup> übersteigt, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die maximal zulässige Anzahl von 35 Überschreitungstagen erreicht wird (vgl. Bezirksregierung Düsseldorf, 2008, S. 32). Aus diesem Grund wird dieser Jahresmittelwert im Rahmen der Modellierung der Eignungskarten als Grenze angesetzt, ab der eine Wohnnutzung ohne Durchführung belastungssenkender Maßnahmen als kritisch angesehen werden muss.

Für NO<sub>2</sub> ist für das Jahr 2008 ein zulässiger Jahresmittelwert von 44 µg/m<sup>3</sup> festgelegt worden (vgl. 22. BImSchV, § 3). Ab einer Überschreitung dieses aus dem Grenzwert für 2010 (40 µg/m<sup>3</sup>) und einer jährlich abnehmenden Toleranzmarge gebildeten Jahresmittelwerts wird, analog zum Vorgehen bei PM<sub>10</sub>, keine bedenkenlose Eignung des entsprechenden Standorts für Wohnnutzung angenommen.

Weder PM<sub>10</sub>, noch NO<sub>2</sub> verfügen nach aktuellem Kenntnisstand über Wirkungsschwellen, bis zu deren Erreichen nicht von einer Gesundheitsgefährdung ausgegangen werden muss. Hinsichtlich beider Luftschadstoffe ist somit eine möglichst weitgehende Unterschreitung des jeweiligen Grenzwertes als sinnvoll anzusehen. Allerdings sollte, in Anlehnung an das im Themenbereich Boden und Lärm angeführte Vorgehen, in die Modellierung einbezogen werden, dass auch ohne die jeweilige urbane Zusatzbelastung für beide Substanzen keine Jahresmittelwerte von 0 µg/m<sup>3</sup> erreicht würden. Die Verwendung eines solchen Werts als Beurteilungsgrundlage für eine maximale Eignung würde somit auch in dem hier betrachteten Fall zu einer systematischen Unterschätzung einer realitätsnahen Eignung eines Standorts für Wohnnutzung führen. Aus diesem Grund wird als untere Grenze maximaler Eignung der aus Messungen im ländlichen Raum berechnete Mittelwert des regionalen Hintergrundniveaus genutzt, d. h. für das Jahr 2006 ein Wert von 20 µg/m<sup>3</sup> für NO<sub>2</sub> und für 22 µg/m<sup>3</sup> für PM<sub>10</sub> (vgl. Bezirksregierung Düsseldorf, 2008, S. 52). Hinsichtlich NO<sub>2</sub> entspricht dieser Wert gleichzeitig einer unter Berücksichtigung der gesundheitlichen Vorsorge ausgesprochenen Empfehlung eines für eine langfristige Belastung in Wohngebieten erstrebenswerten Niveaus, für PM<sub>10</sub> liegen hierüber keine Informationen vor.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> Vgl. <http://www.lanuv.nrw.de/gesundheit/schadstoffe/no2.htm> (Stand: 27.10.2008)

Im Rahmen der Datenmodellierung wurden zunächst die vorhandenen linearen Straßendaten mit einem Buffer von 50 Metern versehen und unter Berücksichtigung der entsprechenden Attribute in jeweils eine straßenbezogene Rasterdatei für PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub> konvertiert. Mittels verschiedener Reklassifizierungs- und Verschneidungsvorgänge wurden diese Flächen aus den ebenfalls in eine Rasterdatei überführten flächig vorliegenden Gesamthintergrundwerten (regionaler Hintergrundwert plus urbane Zusatzbelastung) „ausgestanzt“ und durch die präziseren Daten ersetzt. Die derart erzeugten Dateien wurden im Anschluss über eine ASCII-Datei nach IDRISI exportiert, georeferenziert und mittels des Fuzzy-Tools unter Anwendung einer linearen Transformationsfunktion in eine standardisierte Eignungskarte umgerechnet. Hierzu wurden die eingangs angeführten Mittelwerte des regionalen Hintergrundniveaus des ländlichen Raums als Untergrenze einer maximalen Eignung genutzt (d. h. als Punkt an der die Eignungskurve unter den Wert 255 sinkt), während als Grenze für eine nicht mehr vorhandene Eignung die jeweils zulässigen Jahresmittelwerte angesehen wurden. Für NO<sub>2</sub> wurde hierzu, in Anlehnung an den aktuellen Luftreinhalteplan, auf den für das Jahr 2008 zulässigen Jahresmittelwert von 44 µg/m<sup>3</sup> zurückgegriffen. Anzumerken ist, dass sich bei der Wahl des ab dem Jahre 2010<sup>15</sup> gültigen Grenzwerts von 40 µg/m<sup>3</sup> als Untergrenze einer prinzipiellen Eignung ein nicht unerheblich von der hier genutzten Eignungskarte abweichendes Ergebnis ergeben hätte, ebenso bei der Wahl eines anderen gemittelten Hintergrundwerts als Untergrenze maximaler Eignung. Insofern zeigt sich auch an dieser Stelle die erhebliche Bedeutung einer fundierten im Hinblick auf die Beurteilung der berechneten Ergebnisse aber auch transparenten Datenmodellierung. Für PM<sub>10</sub> wurden den Berechnungen die Werte 22 µg/m<sup>3</sup> sowie 30 µg/m<sup>3</sup> zugrunde gelegt.

Die aus der gewählten Datenmodellierung resultierenden Ergebniskarten sind den beiden folgenden Abbildungen zu entnehmen.

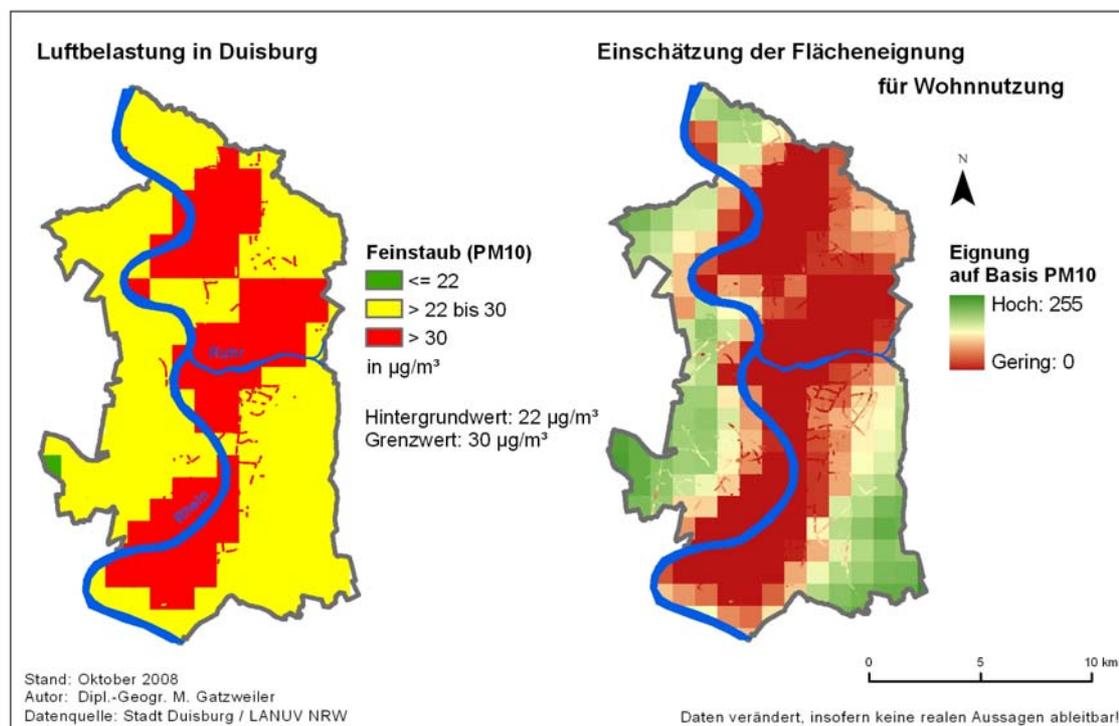
Bei der Betrachtung der Abbildung 4-9 zeigt sich, dass für weite Teile des Untersuchungsgebiets der Grenzwert für PM<sub>10</sub> bereits aufgrund der Gesamthintergrundwerte (d. h. regionaler Hintergrund plus urbane Zusatzbelastung) überschritten ist. Betroffen hiervon sind vor allem großflächige Gebiete im Südwesten, im Zentrum und im Nordosten. Für den Großteil der restlichen Gebiete liegt eine jedoch nicht selten nur gering ausgeprägte Unterschreitung des Grenzwerts vor, so dass für zahlreiche der verfügbaren

---

<sup>15</sup> Ab dem Jahr 2010 wird dem zulässigen Grenzwert keine zusätzliche Toleranzmarge mehr hinzugefügt. Insofern handelt es sich dabei, nach der aktuell gültigen normativen Grundlage, um den zukünftig relevanten Grenzwert. Gerade bei der Suche nach Standorten für langfristig existierende Wohngebiete würden auch Gründe für eine Verwendung dieses Grenzwerts sprechen. In dieser Arbeit wurde dennoch auf den gegenwärtig gültigen Grenzwert zurückgegriffen.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

Straßenabschnitte der Einbezug der lokalen verkehrlichen Zusatzbelastung zu dessen Überschreitung führt. Der als erstrebenswert angesehene Wert von  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wird lediglich für einen Datensatz im äußersten Westen erreicht.



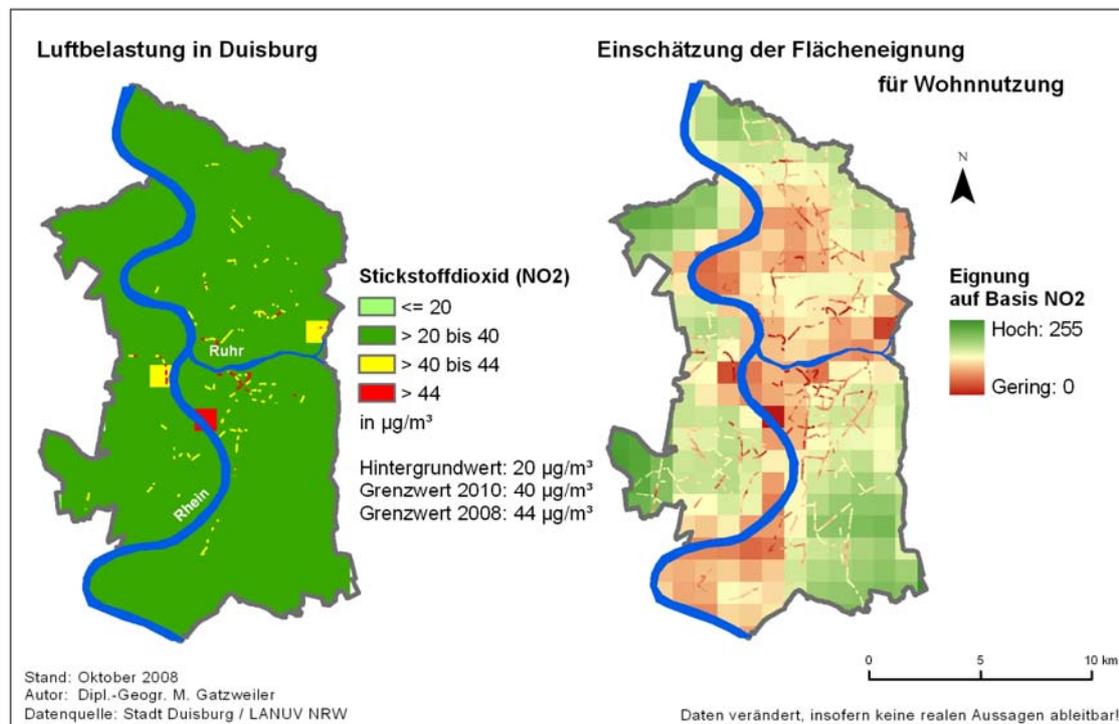
**Abb. 4-9: Luftschadstoffe (Feinstaub PM10): Eingangsdaten und Eignungskarte**

Im Hinblick auf die standardisierte Eignungskarte resultiert aus der modellierten Transformation für den Großteil des Untersuchungsgebiets eine bestenfalls mittlere Eignung für die Errichtung von Wohnbebauung. Insbesondere für große Bereiche des nördlich der Ruhr und östlich des Rheins gelegenen Stadtgebiets sowie im Süden für einen breiten Gürtel entlang des Rheins wurden Eignungswerte von 0 berechnet. Lediglich im äußersten Norden, Westen und Südosten wird eine höhere Eignung ausgewiesen.

Für Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) stellt Abbildung 4-10 die Ergebnisse der Datenmodellierung dar. Dabei zeigt sich, dass an keiner Stelle innerhalb des Untersuchungsgebiets der als erstrebenswertes Ziel einbezogene Mittelwert des regionalen Hintergrundniveaus ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) erreicht oder unterschritten wird. Gleichzeitig wird offenbar, dass für drei Bereiche die Hintergrundwerte den ab dem Jahr 2010 gültigen Grenzwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  überschreiten, wobei ein Datensatz sogar den Grenzwert für das Jahr 2008 ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  plus  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Toleranzmarge) übersteigt. Für den Großteil des Untersuchungsgebiets lässt sich allerdings großflächig eine Unterschreitung beider Grenzwerte erkennen. Unter Berücksichtigung

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

sichtigung der vorhandenen präziseren Straßendatensätze sind aufgrund der Zusatzbelastungen des lokalen Straßenverkehrs an zahlreichen Stellen jedoch Überschreitungen zu verzeichnen.



**Abb. 4-10: Luftschadstoffe (Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>): Eingangsdaten und Eignungskarte**

Durch Transformation der Eingangsdaten in die standardisierte Eignungskarte zeigt sich auf der rechten Seite der Abbildung 4-10 ein kontinuierliches Bild der Flächeneignung. Demnach lässt sich insbesondere im Zentrum des Untersuchungsgebiets, im Südwesten sowie im Nordosten überwiegend eine mittlere bis geringe Flächeneignung für die Etablierung einer Wohnnutzung erkennen. Zudem ist an zahlreichen Straßenabschnitten eine im Vergleich zur unmittelbaren Umgebung geringere Eignung beobachtbar. Die hieran ersichtliche potenziell hohe Bedeutung der lokalen Zusatzbelastung führt, angesichts der nur selektiven Verfügbarkeit dieser Informationen, dazu, dass die Nutzbarkeit der Eignungskarte lediglich unter Vorbehalt geschehen kann. Verstärkend wirkt hierfür die verhältnismäßig geringe lokale Aussagekraft der räumlich gering aufgelösten Hintergrundwerte.

Auch wenn im Rahmen der vorliegenden Arbeit für beide Luftschadstoffe diese Daten den weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt werden, müssen die angeführten Einschränkungen bei der Interpretation der Ergebnisse in Erinnerung behalten werden.

##### **4.1.2 Schutz vorhandener Umweltqualitäten**

Die bislang betrachteten Umweltbelange beziehen sich sämtlich auf Vorbelastungen, die auf die Gesundheit des Menschen bzw. enger gefasst auf die Gesundheit der in den neu zu planenden Wohngebieten zukünftig lebenden Bevölkerung einwirken.

Neben diesem umfangreichen Themenfeld sind im Rahmen einer umfassenden Stadtplanung allerdings auch bestehende Umweltqualitäten zu berücksichtigen, die durch ein spezielles Planvorhaben, wie die Errichtung einer Wohnbebauung, negativ beeinflusst werden können (vgl. BauGB, § 1 Abs. 6.7).

Auch wenn sich in vielen Fällen mehr oder weniger direkte Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch erkennen lassen, steht dieses nicht zwangsläufig im Mittelpunkt des jeweiligen Interesses. Stattdessen sind die Qualitäten verschiedener Umweltbelange, abseits einer reinen anthropozentrischen Sicht, auch als Wert „an sich“ anzusehen (vgl. Kaule, 2002, S. 26 ff. / von Haaren, 2004, S. 32 ff.). Das BNatSchG setzt in diesem Zusammenhang die dauerhafte Sicherung von Natur und Landschaft sowohl aufgrund ihres eigenen Wertes als auch als Lebensgrundlage des Menschen als ausdrückliches Ziel fest (vgl. BNatSchG, § 1). Ebenso ist nach § 1 Abs. 5 BauGB neben der Sicherung einer menschenwürdigen Umwelt auch der Schutz und die Entwicklung der natürlichen Lebensgrundlagen zwingend zu beachten.

Die folgenden Abschnitte behandeln ausgewählte Umweltbelange, um deren spezifische Qualitäten, neben den bereits besprochenen Vorbelastungen, in die Entscheidungsfindung einzubeziehen.

### 4.1.2.1 Schutz des Freiraums

Die fortschreitende Entwicklung von Siedlungsbereichen findet aufgrund eines oft ungleichen Wettbewerbs um den umkämpften Raum nach wie vor in hohem Maße auf Kosten von Freiräumen statt. Dabei wird der Begriff Freiraum in dieser Arbeit, im Gegensatz zum besiedelten innerörtlichen Bereich des Stadtgebiets, vor allem als unbesiedelter und weitgehend unbebauter (Landschafts-)Raum angesehen (vgl. Baier et al., 2006, S. 389, 19 ff., 55 ff.).

Trotz ambitionierter Ziele der Bundesregierung, im Rahmen einer Nachhaltigkeitsstrategie eine deutliche Verminderung des Flächenverbrauchs herbeizuführen, liegt dieser deutschlandweit noch immer auf hohem Niveau (vgl. SRU, 2008, S. 401 f. / vgl. auch MUNLV, 2007a, S. 265 ff., 382).

Angesichts einer in menschlichen Zeiträumen gemessen allenfalls eingeschränkten Wiederherstellbarkeit des Freiraums, bzw. genauer der mit ihm verbundenen biotischen und abiotischen Eigenschaften und Funktionen, muss die Ressource Freiraum grundsätzlich als endlich und, auch unabhängig von den auf einzelne ökologische oder andere funktionelle Belange abzielenden spezifischen Qualitäten, als schützenswertes Gut betrachtet werden (vgl. Baier et al., 2006, S. 46).

Gerade in stark verdichteten Ballungsräumen wie dem hier relevanten Untersuchungsgebiet kommt insbesondere den verbleibenden unbebauten Flächen außerhalb der besiedelten Bereiche eine multifunktionale Bedeutung zu. Unterschiedliche oft nutzungsorientierte Belange weisen bestimmten Bereichen des Freiraums dabei unter Berücksichtigung der jeweiligen spezifischen Erfordernisse entsprechende Qualitäten zu (vgl. Baier et al., 2006, S. 392 ff.). Exemplarisch wird in dieser Hinsicht auf die Bedeutung der Freiraumflächen für den Naturschutz im nächsten Abschnitt näher eingegangen (vgl. Kap. 4.1.2.2).

Weitere derartige Aspekte, wie beispielsweise die besondere Qualität spezieller Flächen im Hinblick auf die Übernahme bestimmter im Bundesbodenschutzgesetz angeführter Bodenfunktionen (vgl. BBodSchG, § 2) und eine daraus resultierende differenzierte Einstufung der Schutzwürdigkeit des Bodens (und somit auch der Fläche), können jedoch innerhalb der vorliegenden Arbeit nicht in die Betrachtung einbezogen werden. Eine umfassende Behandlung aller relevanten Aspekte würde den gesetzten Rahmen bei Weitem sprengen.

Innerhalb dieses Kapitels wird die Datenmodellierung nicht auf die Qualitätsziele einzelner Belange bezogen, sondern auf einen grundsätzlichen Schutz der unbebauten (landschaftlichen) Bereiche des Untersuchungsgebiets.

Nach dem Raumordnungsgesetz sind Siedlungstätigkeiten räumlich zu konzentrieren, gleichzeitig ist der Wiedernutzung brachgefallener Flächen Vorrang vor der Inanspruchnahme von Freiflächen zu geben (vgl. ROG, § 2). In die gleiche Richtung weist die Bodenschutzklausel des Baugesetzbuchs, nach der mit Grund und Boden sparsam und schonend umgegangen werden soll, wobei zur Verringerung der zusätzlichen Flächeninanspruchnahme bauliche Nutzungen vor allem über Maßnahmen der Innenentwicklung wie Flächenrecycling oder Nachverdichtung realisiert werden sollen (vgl. BauGB, § 1a / Krautzberger, 2008, S. 121).

Vor diesem Hintergrund wird auch im Hinblick auf den Freiraumschutz die Eignung von Flächen für Wohnbebauung in dieser Arbeit aufgrund ihrer Lage bzw. Entfernung zu den bereits bestehenden Siedlungsbereichen beurteilt.

Danach sind alle innerhalb dieser bereits bestehenden Siedlungsbereiche liegenden Flächen im Sinne einer Innenentwicklung als maximal geeignet anzusehen. Während Flächen bis zu einer bestimmten Entfernung als ggf. arrondierende Maßnahmen noch zugelassen werden können, muss ab einer bestimmten Entfernung zu bestehenden Siedlungsgebieten eine Eignung abgesprochen werden. Insofern sinkt im Rahmen der Datenmodellierung der Eignungswert mit zunehmender Entfernung und wird ab einer Distanz von 100 Metern mit Null belegt.

Durch eine derartige Datenmodellierung wird gleichzeitig, wenn auch nur in vereinfachender Weise, einem strukturellen Freiraumschutz Rechnung getragen, dessen Ziel in der größtmöglichen Erhaltung funktionstüchtiger, ausreichend dimensionierter Freiraumflächen liegt (vgl. Baier et al., 2006, S. 402). Eine Förderung disperser Siedlungsstrukturen, die nicht selten auch aus verschiedenen weiteren Gründen negative Auswirkungen bedeuten (u. a. zusätzliche Verkehrserzeugung sowie Belastung kommunaler Haushalte zur Aufrechterhaltung der Erschließung), würde demgegenüber sowohl durch die eigentlichen Wohnbauflächen als auch durch erforderliche bauliche und technische Infrastrukturanlagen zu einer zunehmenden Fragmentierung der Landschaft führen.

Eine Möglichkeit das Ausmaß der Freiraumzerschneidung ausdrücklicher in die Datenmodellierung und somit in die Generierung der Eignungskarten einzubeziehen, bieten verschiedene Landschaftsstrukturmaße. Vor allem Zerschneidungsmaße wie die effektive Maschenweite stellen in dieser Hinsicht einen sinnvollen Kennwert dar, der je nach

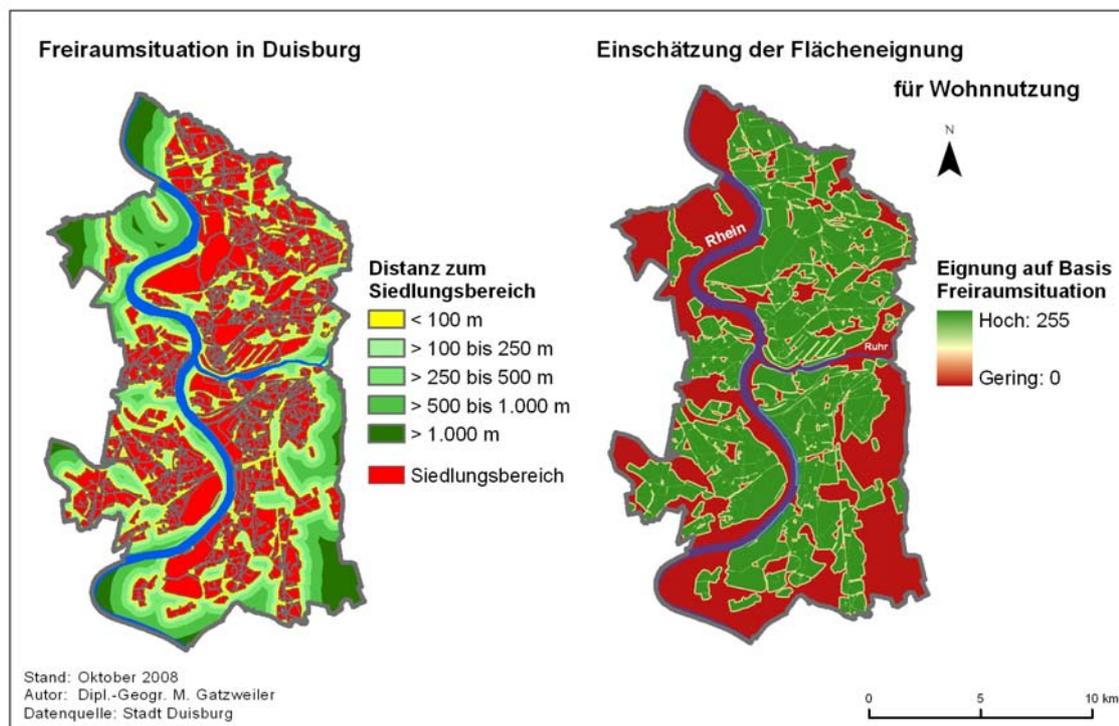
absoluter und relativer Ausprägung für einzelne Bereiche des Landschaftsraums (so genannte Patches) ein mehr oder weniger großes Schutzerfordernis anzeigen kann. Andere Indizes (z. B. der Kernflächen- oder Nachbarschaftsanalyse) können unter Berücksichtigung spezieller Themenfelder, wie z. B. dem Schutz gefährdeter Tierarten, zusätzliche Beurteilungsgrundlagen für Flächenausweisungen schaffen (vgl. Lang/Blaschke, 2007, S. 257 ff., 223 ff. / Baier et al., 2006, S. 360 ff.).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit können diese Ansätze jedoch nicht weiter verfolgt werden. Stattdessen orientiert sich die Beurteilung der Flächeneignung im Hinblick auf den Freiraumschutz wie angeführt an der Distanz zu bestehenden Siedlungsgebieten. Hierzu wurden zunächst auf Basis der gegenwärtigen Flächennutzungsausweisungen der Stadt Duisburg die Gebiete ermittelt, die in dieser Arbeit als Innenbereich definiert werden sollen. Einbezogen wurden dabei die für Industrie, Gewerbe und Wohnen sowie diese begleitenden Nutzungsformen des Gemeinbedarfs ausgewiesenen Flächen. Die ermittelten Bereiche wurden im Anschluss unter Berücksichtigung des aktuellen Stadtplans sowie Luftbildern aus dem Jahr 2006 einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Dabei wurden vereinzelt Flächen entfernt, andere hinzugefügt, um an verschiedenen Stellen größere Abweichungen zu beseitigen. Abbildung 4-11 zeigt auf der linken Seite die im Weiteren in dieser Arbeit als Siedlungs- bzw. Innenbereich berücksichtigten Flächen. Umgekehrt wurden alle Flächen für Land- und Forstwirtschaft, Gewässer sowie Grünflächen unterschiedlicher Art als unbebaute Bereiche definiert. Auf diese Weise wurden, wie in Abbildung 4-11 ersichtlich, nicht nur die oftmals großflächigen landschaftlichen Freiräume als vor neuer Bebauung schützenswert modelliert, sondern auch innerhalb der Siedlungsbereiche liegende größere Grünflächen.

Im Anschluss wurde ausgehend von den als Siedlungsgebiet definierten Bereichen des Untersuchungsgebiets eine Distanzoberfläche berechnet. Mittels einer linearen Transformationsfunktion wurde diese nach dem Export in die Software IDRISI unter Anwendung des Fuzzy-Tools in eine Eignungskarte überführt (vgl. Abb. 3-2). Dabei wird die Eignung mit zunehmender Entfernung zu den Siedlungsbereichen als abnehmend modelliert, wobei entsprechend der im Vorfeld angeführten Überlegungen in dieser Arbeit unterstellt wird, dass ab einer Distanz von 100 Metern die Eignung den Wert 0 annimmt. Flächen, die innerhalb der bestehenden Siedlungsbereiche liegen, erhalten den maximalen Eignungswert (255), d. h. die Ausweisung neuer Wohnflächen in den derzeit bereits besiedelten Bereichen des Untersuchungsgebiets (z. B. durch Nachverdichtung

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

oder Recycling brach gefallener Flächen) wird im Hinblick auf den Freiraumschutz als optimal angesehen.



**Abb. 4-11: Freiraumsituation und Eignungskarte**

Insgesamt zeigt Abbildung 4-11, dass überwiegend in verschiedenen randlichen Bereichen des Untersuchungsgebiets aus Sicht des Freiraumschutzes eine Eignung für die Errichtung von Wohnbebauung abgesprochen werden muss. Umgekehrt lassen sich vor allem im Südwesten aber auch weiten Teilen des rechtsrheinischen Stadtgebiets großflächige Siedlungsbereiche beobachten, die vor allem im Norden nur geringfügig durch größere Freiflächen unterbrochen sind. Entsprechend sind diese Bereiche durch eine hohe Eignung gekennzeichnet.

##### **4.1.2.2 Schutz der Natur**

Die Erhaltung und Entwicklung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts ist ein wesentlicher Aspekt, der nicht nur wegen seiner Relevanz für die Lebensqualität des Menschen, sondern auch aufgrund des Eigenwerts der jeweiligen Schutzgüter, in der Stadtplanung Berücksichtigung finden muss (vgl. BNatSchG, § 1). Der Schutz der Lebensräume von Tieren und Pflanzen ist somit ein weiteres in der vorliegenden Arbeit näher betrachtetes Entscheidungskriterium.

Gerade in hoch verdichteten altindustrialisierten Ballungsräumen wie dem hier relevanten Untersuchungsgebiet sind die verhältnismäßig naturnahen Flächen quantitativ oft stark begrenzt. Den im letzten Abschnitt angesprochenen Freiräumen insbesondere außerhalb der besiedelten Bereiche kommt somit häufig eine besondere Bedeutung für den Naturschutz zu. Da jedoch auch Flächen innerhalb des Siedlungsbereichs als Ersatzlebensräume von zum Teil seltenen und gefährdeten Tieren und Pflanzenarten genutzt werden (vgl. MUNLV, 2007a, S. 292 ff.), kann eine Betrachtung nicht alleine auf die unbesiedelten (landschaftlichen) Gebiete beschränkt bleiben.

Hieraus ergäbe sich das Erfordernis, eine umfassende Prüfung aller Flächen des Untersuchungsgebiets vorzunehmen, in der die vorgefundenen Tiere und Pflanzenarten sowie deren Lebensräume unter Berücksichtigung von Kriterien wie Naturnähe, Seltenheit, Gefährdung, Besonderheit, Diversität, Regenerierbarkeit und Ersetzbarkeit einer detaillierten naturschutzfachlichen Bewertung unterzogen werden (vgl. Kaule, 2002, S. 190 ff. / Barsch/Bork/Söllner, 2003, S. 140 f. / van Haaren, 2004, S. 236 ff.). Ein derartiges Datenmaterial konnte der vorliegenden Arbeit allerdings nicht zugrunde gelegt werden.

Stattdessen musste auf die vorhandenen naturschutzbezogenen Kenntnisse zurückgegriffen werden, die sich in unterschiedlichen Ausweisungen schützenswerter Gebiete manifestiert haben.

Einbezogen wurden dabei die gemeldeten „NATURA 2000“-Gebiete, die im Landschaftsplan der Stadt Duisburg festgesetzten Naturschutzgebiete (NSG), geschützten Landschaftsbestandteile (GLB) und Landschaftsschutzgebiete (LSG), die bekannten geschützten Biotope nach § 62 des Landschaftsgesetzes NRW sowie die im Kataster des LANUV vermerkten Biotope.<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> Hinsichtlich der Schutzgebiete wurde dabei einerseits auf die von der Unteren Landschaftsbehörde der Stadt Duisburg gelieferten Daten u. a. zum Landschaftsplan zurückgegriffen, andererseits auf die auf der Internetseite des LANUV NRW bereitgestellten Daten zum Biotopkataster (vgl. <http://www.naturschutz-fachinformationssysteme-nrw.de/bk/content/de/download/lizenz.html?jid=0o3> (Stand: 27.10.2008)).

Da keine Informationen zu der nach § 22 BNatSchG eingeräumten Möglichkeit die gesetzlich festgesetzten Schutzgebiete in Zonen unterschiedlichen Schutzes zu untergliedern vorlagen und eine differenzierte naturschutzfachliche Beurteilung der Einzelflächen innerhalb der einbezogenen Schutzgebiete im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden konnte, wurde die Schutzwürdigkeit der Flächen sowohl innerhalb der einzelnen Schutzgebiete, als auch innerhalb der jeweiligen Schutzgebietskategorie vereinfachend als homogen unterstellt.<sup>17</sup>

Für die weiteren Arbeitsschritte wurde somit keine Kartierung einer naturschutzfachlich begründeten Wertigkeit der Einzelflächen genutzt, sondern eine pauschalisierte Karte des sich aus dem jeweiligen Schutzstatus der Flächen ergebenden Raumwiderstands gegenüber den zu erwartenden Auswirkungen einer Wohnbebauung.

Dabei wird angenommen, dass der Raumwiderstand bei den „NATURA 2000“-Gebieten aufgrund der internationalen Bedeutung dieser Flächen am stärksten ausgeprägt ist. Die Überwindung der potenziellen Unverträglichkeit einer Planung mit den Zielen eines derartigen Gebietes des europäischen Biotopverbundsystems ist nur in wenigen begründeten Fällen ausnahmsweise möglich und bedarf einer strengen gesetzlich definierten Prüfung (vgl. BNatSchG, §§ 32-37 / Lang/Blaschke, 2007, S. 273 / von Haaren, 2004, S. 67).

Ein aufgrund der „lediglich“ nationalen Wirkung des Schutzstatus geringerer Raumwiderstand wird für Naturschutzgebiete nach § 23 BNatSchG und § 20 des Landschaftsgesetzes NRW (LG NRW) unterstellt. Flächen dieser Kategorie sind jedoch aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für bestimmte Tier- und Pflanzenarten als zentrale Vorranggebiete eines Verbunds ökologisch wertvoller Bereiche anzusehen und besitzen somit eine hohe Schutzwirkung.

Der gleiche Schutzstatus wird für geschützte Landschaftsbestandteile nach § 29 BNatSchG und § 23 LG NRW sowie für bestimmte Biotope unterstellt, die nach § 30 BNatSchG in Verbindung mit § 62 des Landschaftsgesetzes NRW als besonders schutzwürdig ausgewiesen sind. Diese oft sehr kleinflächigen Biotope sind pauschal als Lebensraum besonders geschützt und bedürfen somit, auch wenn nicht selten innerhalb der Grenzen eines großräumigen Schutzgebiets verortet, keines ausdrücklichen Schutzgebietes.

---

<sup>17</sup> Denkbar könnte in diesem Zusammenhang u. a. auch eine differenzierte Beurteilung spezifischer Teilflächen eines Schutzgebiets unter Berücksichtigung ausgewählter im letzten Kapitel bereits angeführter Landschaftsstrukturmaße sein.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

---

Ein erneut verringerter Raumwiderstand wird den Landschaftsschutzgebieten nach § 26 BNatSchG und § 21 LG NRW zugeschrieben. Der Schutzstatus dieser nicht selten großflächig ausgebildeten und zum Teil als Puffer um Naturschutzgebiete und geschützte Landschaftsbestandteile gelegenen landschaftsplanerischen Vorsorgegebiete ist dabei in der Regel leichter zu überwinden als bei den zuvor aufgeführten Schutzgebieten (vgl. MUNLV, 2007a, S. 306 ff. / von Haaren, 2004, S. 406 ff. / Barsch/Bork/Söllner, 2003, S. 77 ff.).

Über die bislang dargestellten auf gesetzlicher Grundlage formal ausgewiesenen Schutzgebiete hinaus wurde im Rahmen dieser Arbeit auch das Biotopkataster des LANUV genutzt<sup>18</sup>, in dem zusätzlich zahlreiche weitere Flächen aufgeführt werden, für die aus naturschutzfachlicher Sicht die Ausweisung eines Schutzstatus vorgeschlagen wird. So lange ein solcher allerdings nicht formal festgesetzt wurde, muss der Raumwiderstand als verhältnismäßig gering eingestuft werden.

Zudem wurden alle Waldflächen mit einem verhältnismäßig hohen Raumwiderstand versehen, um vor dem Hintergrund der besonderen zeitlichen Anforderungen an die Regenerierbarkeit dieses Biotoptyps, dem Ziel entsprechend Rechnung zu tragen, den im Verhältnis zu vergleichbaren Großstädten ohnehin geringen Waldanteil im Untersuchungsgebiet zu halten bzw. weiter auszubauen (vgl. LDS NRW, 2008) (vgl. Tab. 4-2). Bei der Einstufung dieser Raumwiderstandskategorie wird aus diesem Grund auch nicht zwischen innerhalb und außerhalb eines Schutzgebiets liegenden real existierenden Waldflächen unterschieden.

Insgesamt wurde somit eine Karte erstellt, in welcher der Raumwiderstand der Flächen entsprechend der in der folgenden Tabelle enthaltenen Wertigkeiten modelliert wurde.

**Tab. 4-2: Schutzstatusspezifischer Raumwiderstand und resultierende Eignung**

Schutzgebiet	NATURA 2000	NSG / GLB / Biotope nach § 62 LG NRW	Wald	LSG	Sonstige Bio- tope nach dem Biotopkataster des LANUV
<b>Raumwiderstand</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>4</b>
<b>Eignung</b>	<b>Constraint</b>	<b>0</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	<b>175</b>

---

<sup>18</sup> Insofern soll an dieser Stelle entsprechend der Lizenzvereinbarung darauf hingewiesen werden, dass die Karten zum Themenfeld Natur und Landschaft u. a. auch „unter Verwendung von Sach- und Grafikdaten des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV), Aktualisierungsdatum: Mai 2008“ erstellt wurden.

Hervorzuheben ist dabei, dass im Falle einer Überlagerung unterschiedlicher Schutz-  
ausweisungen grundsätzlich der Widerstand der höchsten Ausweisung zugrunde gelegt  
wird. So wurden beispielsweise innerhalb von Landschaftsschutzgebieten die Areale,  
die zugleich als geschützte Biotope nach § 62 Landschaftsgesetz NRW ausgewiesen  
sind, mit einem Raumwiderstand von acht belegt (vgl. Tab. 4-2).

Grundsätzlich muss bei der gewählten Art der Datenmodellierung allerdings berück-  
sichtigt werden, dass trotz der numerischen Kodierung der Ausprägungen, keine Aussa-  
gen zu den Abständen zwischen den einzelnen Kategorien, sondern lediglich zur Ord-  
nung der Raumwiderstände möglich ist. Mathematische Operationen sind somit auf-  
grund der ordinalskalierten Daten streng genommen nicht zulässig.

Im Rahmen der Datenmodellierung wurden zunächst die als Eingangsdaten genutzten  
Vektordaten in verschiedener Hinsicht nachbearbeitet, um sie im Anschluss differen-  
ziert nach den einzelnen Schutzgebieten in getrennte Rasterdatensätze überführen zu  
können. Unter Anwendung verschiedener Reklassifizierungs- und Verschneidungsvor-  
gänge wurden die Einzeldaten so in eine umfassende Datengrundlage überführt, dass  
alle Alternativen (Rasterzellen, vgl. Kap. 3.3) unter Berücksichtigung der in Tabelle 4-2  
dargestellten Wertausprägungen entsprechend ihres maximalen Raumwiderstands aus-  
gewiesen werden.

Die somit vorliegende Raumwiderstandskarte wurde im Anschluss in eine Eignungskar-  
te umgerechnet. Im Gegensatz zu den bislang behandelten Kriterienkarten wurde hierzu  
nicht auf eine mathematische Transformationsfunktion zurückgegriffen, sondern auf-  
grund der ordinalskalierten qualitativen Datengrundlage eine Umrechnung auf Basis  
manueller Wertezuweisung durchgeführt. Hierzu wurden die ebenfalls in Tabelle 4-2  
enthaltenen Eignungswerte genutzt.

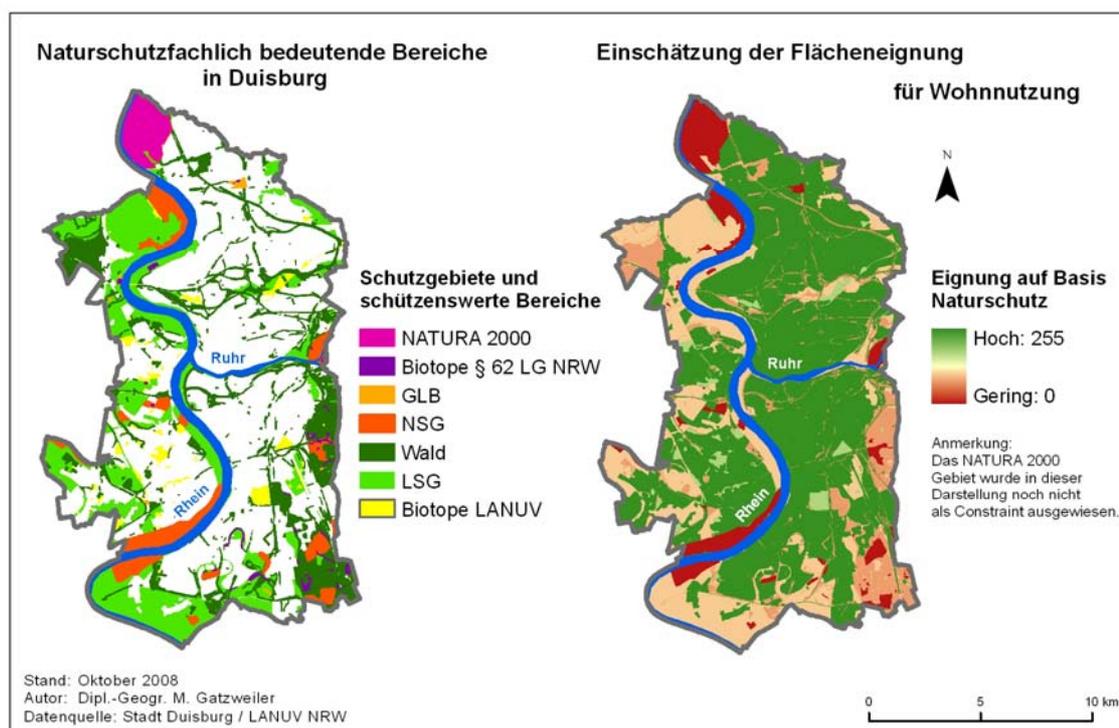
„NATURA 2000“-Gebiete wurden dabei als Constraints definiert, d. h. die entspre-  
chenden Flächen werden aus dem weiteren Entscheidungsfindungsprozess ausgeschlos-  
sen (vgl. Kap. 3.2 bzw. 4.2). Angesichts der konkreten Situation im Untersuchungsge-  
biet müssen die Hürden der im Vorfeld angeführten gesetzlich vorgeschriebenen Ver-  
träglichkeitsprüfung als so hoch angesehen werden, dass eine Überwindung für die hier  
relevante Flächennutzungsform „Wohnen“ als vollkommen unrealistisch anzusehen ist.  
Insofern würde selbst eine Eignung von 0 die Entscheidungssituation nur unzureichend  
wiedergeben, da auf diese Weise die entsprechenden Bereiche einer Abwägung zugäng-  
lich wären. NSG, GLB und Biotope nach § 62 LG NRW werden demgegenüber auf-

grund ihres zwar sehr hohen Raumwiderstands aber einer im konkreten Fall nicht prinzipiell ausgeschlossenen Überwindbarkeit mit einer Eignung von 0 belegt. Dem geringeren Raumwiderstand der Kategorien Wald und LSG wurde eine Eignung von 75 bzw. 100 zugeordnet, während die sonstigen Biotopie aufgrund des verhältnismäßig geringen Raumwiderstands eine im Vergleich zu den übrigen Kategorien relativ hohe Eignung von 175 erhielten.

Wie bei verschiedenen anderen bislang behandelten Entscheidungskriterien, so muss auch und gerade in dem in diesem Abschnitt behandelten qualitativen Zusammenhang betont werden, dass sowohl die hier zugrunde gelegten Festsetzungen des Raumwiderstands als auch die darauf aufbauende Zuweisung von Eignungswerten nicht zwingend unstrittig sein müssen, sondern je nach einbezogenem Entscheidungsträger ggf. andere Werteausprägungen erhalten können. Zudem wird auch diskussionsfähig sein, ob die Kategorie NSG, GLB und Biotopie nach § 62 LG NRW ebenso wie die „NATURA 2000“-Gebiete als Constraints definiert werden sollten. An dieser Stelle bekommt die schwer handhabbare Frage einer grundsätzlichen Vergleichbarkeit der Kriterien insbesondere im Hinblick auf die Grenze, ab der eine Eignung abgesprochen wird, eine besonders offenkundige Bedeutung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die in Tabelle 4-2 dargestellten Werte jedoch als sinnvoll betrachtet und den weiteren Arbeitsschritten zugrunde gelegt.

Abbildung 4-12 stellt die in der Raumwiderstandskarte berücksichtigten Gebietskategorien und die daraus resultierende Eignungskarte dar. Sofern sich in einigen Bereichen verschiedene Kategorien überlagern, werden jeweils die Kategorien dargestellt, die einen höheren Raumwiderstand aufweisen.



**Abb. 4-12: Naturschutz: Eingangsdaten und Eignungskarte**

Bei der Betrachtung der beiden Arbeitskarten lässt sich beobachten, dass an verschiedenen Stellen innerhalb des Untersuchungsgebiets, insbesondere aber entlang des Rheins, großflächige Gebiete mit zum Teil hohem Raumwiderstand und entsprechend geringer Flächeneignung vorhanden sind (NSG, LSG). Im Osten, Südosten sowie Nordwesten lassen sich größere zusammenhängende Waldflächen erkennen, im Norden ist ein „NATURA 2000“-Gebiet verortet, das im Hinblick auf die beschriebene Datenmodellierung aus der späteren Entscheidungsfindung ausgeblendet wird (vgl. Kap. 4-2). Insgesamt weist die Eignungskarte aus Sicht des Naturschutzes vor allem in verschiedenen randlich gelegenen Bereichen des Untersuchungsgebiets geringe bis zum Teil sehr geringe Eignungen für die Errichtung von Wohnbebauung aus.

##### **4.1.2.3 Schutz des Trinkwassers**

Die Gewährleistung der gesicherten Verfügbarkeit ausreichender Mengen qualitativ hochwertigen Trinkwassers ist ein für die Gesundheit des Menschen weiterer zentraler Belang. Im Gegensatz zu den in Abschnitt 4.1.1 behandelten Themenfeldern, bei denen die Gesundheit der in den zu planenden Wohngebieten angesiedelten Bevölkerung im Mittelpunkt des Interesses stand, bezieht sich der in diesem Abschnitt angesprochene Gesundheitsschutz jedoch auf das Wohl der Allgemeinheit.

In NRW basiert die öffentliche Wasserversorgung vor allem auf aus Talsperren gespeistem Oberflächenwasser, Grund- und Quellwasser sowie in hohem Maße auf oberflächenwasserbeeinflusstem Grundwasser, das in NRW insbesondere aus künstlich angereichertem Grundwasser oder Uferfiltrat<sup>19</sup> gewonnen wird (vgl. MUNLV, 2007a, S. 230 ff.).

Zur Verhinderung nachteiliger Einwirkungen auf die für die Wasserversorgung relevanten Gewässer besteht die gesetzlich eingeräumte Möglichkeit, Schutzgebiete auszuweisen. Da mit zunehmender Nähe zur Wassergewinnungsanlage das von einer Verunreinigung ausgehende Gefahrenpotenzial steigt, werden die Schutzgebietgebiete üblicherweise mit abnehmender Distanz zur Anlage in Zonen zunehmenden Schutzstatus untergliedert. Über entsprechende Verordnungen kann, ausgerichtet auf die speziellen Erfordernisse der jeweiligen Wasserschutzgebiete (WSG), ein nach den Zonen differenziertes Spektrum der erlaubten und verbotenen Handlungen festgesetzt werden (vgl. WHG, § 19 / LWG, § 14).

In dem hier relevanten Untersuchungsgebiet sind insgesamt drei Wasserwerke verortet, die über förmlich festgesetzte Trinkwasserschutzzonen (TWS-Zone) verfügen. Die drei Schutzgebietsverordnungen wurden im Hinblick auf Art und Umfang zulässiger Raumnutzungen ausgewertet und die Ergebnisse für die weiteren Arbeitsschritte entsprechend aufbereitet (vgl. WSG-Verordnung Bockum / WSG-Verordnung Rumeln / WSG-Verordnung Binsheimer Feld).

Die TWS-Zonen der Klasse I umfassen das nahe Umfeld der Wassergewinnungsanlagen. Sie besitzen den höchsten Schutzstatus, da im Falle einer Verunreinigung die Qualität des Trinkwassers nahezu unmittelbar beeinträchtigt würde. In allen hier betrachte-

---

<sup>19</sup> Bei Uferfiltrat handelt es sich um Wasser, das über die Böschung und die Sohle eines Gewässers in den angrenzenden Grundwasserkörper eintritt. Durch die Filterung der überwiegend sand- und kieshaltigen Bodenschichten wird das Oberflächenwasser dabei gereinigt (vgl. Bahadir/Parlar/Spiteller, 2000, S. 1213 / MUNLV, 2007a, S. 233).

ten TWS-Zonen der Klasse I sind lediglich die zur Aufrechterhaltung des Betriebs erforderlichen Maßnahmen gestattet.

Auch die jeweils anschließenden TWS-Zonen der Klasse II sind erheblichen Nutzungsbeschränkungen unterworfen, da in allen Fällen die Errichtung oder Erweiterung baulicher Anlagen ausdrücklich verboten ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind unter dem Gesichtspunkt der Ermittlung geeigneter Wohngebietsstandorte die Schutzzonen I und II somit als Constraints anzusehen (vgl. Kap. 4.2).

Die TWS-Zonen der Klasse III beginnen am äußeren Rand der Zonen der Klasse II und somit an der Grenze, ab der das Wasser ca. 50 Tage benötigt um zu den Gewinnungsanlagen zu gelangen. Innerhalb dieses Zeitraums kann unterstellt werden, dass insbesondere eine von potenziell krankheitserregenden Keimen ausgehende Gesundheitsgefährdung überwiegend abgebaut ist.

In allen drei relevanten WSG ist innerhalb der Zonen der Klasse III zum Schutz vor weniger leicht abbaubaren Gefahrenpotenzialen die Errichtung baulicher Anlagen sowie zusätzlicher für eine Wohnnutzung erforderlicher Infrastruktur (z. B. Kanalanlagen oder Straßen und Wege) genehmigungspflichtig.

Für die Modellierung der Eignungskarte wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit angenommen, dass die Eignung innerhalb der TWS-Zone III mit zunehmender Entfernung zu der als Constraint zu definierenden TWS-Zone II ansteigt, da potenzielle die Trinkwasserqualität gefährdende Verunreinigungen umso stärker abgebaut werden, je größer die euklidische Distanz zur 50-Tage-Linie bzw. zur Wassergewinnungsanlage ist und somit vereinfachend unterstellt die Bodenpassage des Grundwassers andauert. Zudem besteht bei größerer Distanz im schlimmsten Fall eine längere Zeitspanne zur Einleitung angemessener Sicherungsmaßnahmen. Unterschiedliche Bodeneigenschaften und die entsprechenden Auswirkungen auf die auf das Grundwasser einwirkende Filter-, Puffer- und Transformationswirkung sowie auf dessen Fließverhalten und Fließgeschwindigkeit werden dabei allerdings unberücksichtigt gelassen (vgl. Sukopp/Wittig, 1998, S. 197 f. / Barsch/Bork/Söllner, 2002, S. 333 ff.). Um diese Faktoren einbeziehen zu können wäre für jede TWS-Zone ein umfassendes hydrogeologisches Modell erforderlich. Da Daten dieser Art im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zur Verfügung standen, wurden vereinfachend lediglich die festgesetzten Schutzzonengliederungen und die jeweiligen Distanzen als Beurteilungsgrundlage herangezogen.

Außerhalb der TWS-Zone III, deren äußere Grenze das Ende des jeweiligen Wassereinzugsgebiets markiert, kann eine Wohnnutzung aus Sicht des Schutzbedarfs der jeweiligen Wasserschutzgebiete als unbedenklich eingestuft werden.

Da keine Informationen zu weiteren schutzbedürftigen Grundwasservorkommen innerhalb des Untersuchungsgebiets vorliegen, wird die Eignung für Wohnnutzung außerhalb der angeführten TWS-Zonen somit unter Berücksichtigung dieses Umweltbelangs als maximal angesehen. Ein über die besondere Schutzbedürftigkeit ausgewiesener Zonen hinausgehender Grundwasserschutz kann im Rahmen dieser Arbeit aus Gründen der Datenverfügbarkeit nicht behandelt werden. Denkbar wäre in diese Hinsicht jedoch der Einbezug einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Grundwasserempfindlichkeit u. a. auf Basis der jeweiligen Grundwasserflurabstände und Bodenarten bzw. Bodeneigenschaften.

Zur Modellierung der Eignungskarte wurden die Wasserschutzgebiete digitalisiert, in einzelne Rasterdateien überführt und im Laufe des alle WSG isoliert betrachtenden Bearbeitungsprozesses mehrfachen Reklassifizierungen und Verschneidungen unterworfen.

Während die TWS-Zonen III a näherungsweise eine um die TWS-Zonen I liegende konzentrische Form aufweisen, stellen die Zonen der Kategorie III b zum Teil großflächige Gebiete dar, die jedoch nur an bestimmten Stellen an die Zonen der Kategorie III a anschließen. Für die Modellierung wurde zunächst eine von den TWS-Zonen II ausgehende auf die Abgrenzungen der TWS-Zone III a beschränkte Distanzoberfläche berechnet. Die Standardisierung erfolgte unter Anwendung des Fuzzy-Tools der Software IDRISI auf Basis einer linearen Funktion, wobei der jeweils maximalen Entfernung eine Eignung von 200 (statt 255) zugewiesen wurde. Die derart erzeugten gebietspezifischen Eignungskarten wurden im Anschluss zu einem einheitlichen Datensatz verschnitten. Hinsichtlich der weniger schutzbedürftigen Zonen der Kategorie III b wurde für die drei betrachteten WSG eine unterschiedliche Herangehensweise gewählt. Für das WSG Binsheimer Feld wurde ausgehend von der TWS-Zone III a eine auf die TWS-Zone III b beschränkte Distanzoberfläche berechnet. Mittels einer linearen Transformationsfunktion wurde in Abhängigkeit von der Entfernung zu dieser Grenze eine Eignungskarte mit dem Wertebereich von 200 bis 255 modelliert. Die Fläche mit der maximalen Entfernung zur TWS-Zone III a besitzt auf diese Weise eine Eignung von 255, Flächen in unmittelbarer Nachbarschaft eine Eignung von 200. Für das südliche

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

WSG Bockum ließ sich ein solches Vorgehen aufgrund der weit über das Untersuchungsgebiet hinausgehenden Grenzen der TWS-Zone III b nicht realisieren. Insofern wurde den jeweiligen Flächen pauschal ein Wert von 200 zugewiesen, um im Rahmen des definierten Wertebereichs einen maximalen Schutz des Trinkwassers durch die kleinstmögliche Eignung zu gewährleisten. Das dritte WSG verfügt innerhalb des Untersuchungsgebiets über keine Bereiche der TWS-Zone III, so dass hier keine Modellierungen erforderlich waren. Auch an dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass vor allem hinsichtlich der konkreten Vergabe der Schwellenwerte der linearen Transformationsfunktionen auch andere Einteilungen mit entsprechenden Auswirkungen auf die Ergebniskarte hätten genutzt werden können.

Insgesamt stellt die Eignungskarte somit die Flächen der TWS-Zone I und II zunächst mit einer Eignung von 0, die Flächen der TWS-Zone III a in Abhängigkeit von der Entfernung zur 50-Tage-Linie mit einer Eignung von 0 bis 200 und die Flächen der TWS-Zone III b mit einer Eignung von 200 (bis 255) dar. Außerhalb der WSG liegende Bereiche des Untersuchungsgebiets verfügen demgegenüber über eine aus Sicht des Belangs Trinkwasserschutz optimale Eignung (255).

Die drei Wasserschutzgebiete mit den jeweils innerhalb des Untersuchungsgebiets liegenden TWS-Zonen können ebenso wie die aus dem angeführten Vorgehen resultierende Eignungskarte der folgenden Abbildung entnommen werden.

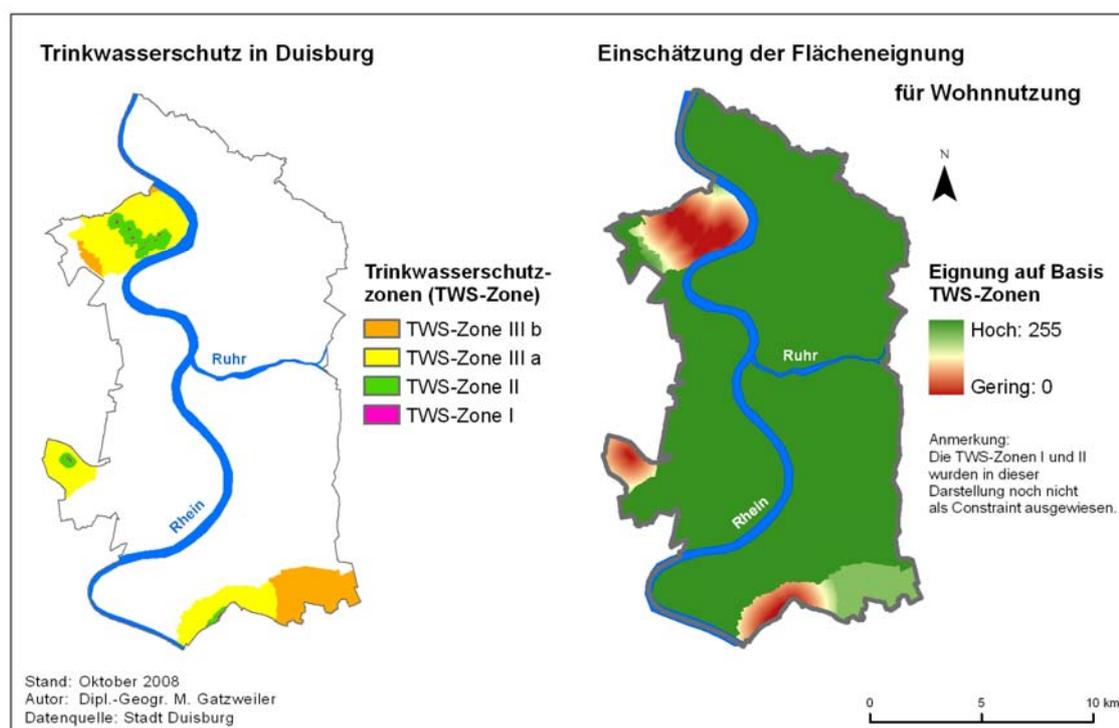


Abb. 4-13: Trinkwasserschutz: Eingangsdaten und Eignungskarte

Es zeigt sich, dass bei einer Beschränkung des Grundwasserschutzes auf die Trinkwasserschutzzonen der Großteil des Untersuchungsgebiets mit einer hohen Eignung für die Errichtung von Wohnbebauung ausgewiesen wird. Lediglich die in den Randbereichen des Stadtgebiets verorteten Trinkwasserschutzzonen lassen in Abhängigkeit von der angeführten Datenmodellierung geringere Eignungswerte erkennen.

#### **4.2 Constraints**

In den bisher dargestellten Schritten des Entscheidungsprozesses wurden die Grundlagen gelegt, um die Entscheidungssituation möglichst angemessen modellieren zu können. Auf Basis der Analyse der Problemstellung wurden die zu betrachtenden Kriterien ermittelt und die entsprechenden Daten unter Berücksichtigung ausgewählter fachlicher Vorgaben in themenspezifische standardisierte Eignungskarten umgerechnet, die dazu dienen, die einzelnen Alternativen (Rasterzellen) im Hinblick auf den Grad der jeweiligen Zielerreichung zu beurteilen. Im Weiteren werden diese einer Abwägung zugänglichen kriterienspezifischen Eignungskarten der Zielhierarchie sukzessive folgend zu einer umfassenden Entscheidungsgrundlage zusammengeführt.

Zuvor sind jedoch potenzielle Restriktionskriterien zu ermitteln, aufgrund derer die hier betrachtete Realisierung von Wohnbebauung an bestimmten Stellen des Untersuchungsgebiets ausgeschlossen werden muss, die entsprechenden Alternativen somit einer weiteren Betrachtung im Entscheidungsfindungsprozess vollständig entzogen werden (vgl. Kap. 3.2).

Im vorliegenden Fall lassen sich derartige Constraints auf normative Regelungen und real existierende Gegebenheiten zurückführen.

Im Hinblick auf normativ begründete Restriktionen wurde in vorangegangenen Abschnitten bereits auf die „NATURA-2000“-Gebiete sowie die Trinkwasserschutzzonen der Kategorie I und II hingewiesen. Während die Errichtung baulicher Anlagen in den angeführten TWS-Zonen unter Berücksichtigung der erlassenen Verordnungen verboten ist, müssen bezogen auf die „NATURA-2000“-Gebiete die Hürden einer gesetzlich vorgeschriebenen Verträglichkeitsprüfung für das betrachtete Untersuchungsgebiet als unüberwindbar angesehen werden. Beide Kriterien führen somit zu einem Ausschluss der entsprechenden Flächen aus dem weiteren Entscheidungsprozess.

Als zusätzliche normativ begründete Restriktion sind im vorliegenden Fall die Überschwemmungsgebiete der beiden im Untersuchungsgebiet liegenden großen Fließgewässer Rhein und Ruhr zu betrachten. Als Überschwemmungsgebiete werden dabei nach § 31 b des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) vor allem die Bereiche zwischen oberirdischen Gewässern und Deichen bezeichnet, die bei Hochwasser überschwemmt oder durchflossen werden. Nicht zuletzt aufgrund des mit einem Hochwasserereignis verbundenen in mehrerer Hinsicht hohen Schadenspotenzials ist nach § 31 b WHG in Verbindung mit § 113 des Landeswassergesetzes (LWG NRW) in diesen Bereichen die Ausweisung neuer Baugebiete verboten bzw. lediglich in Ausnahmefällen unter erheblichen Anforderungen gestattet. Angesichts der konkreten Situation im Untersuchungsgebiet kann, ähnlich wie bei der Betrachtung der „NATURA-2000“-Gebiete, davon ausgegangen werden, dass die Hürden für eine derartige Ausnahmegenehmigung unerreichbar hoch sind, so dass die Überschwemmungsgebiete im Rahmen dieser Arbeit als Constraints definiert werden.

Als Datengrundlage werden die von der Oberen Wasserbehörde festgesetzten Überschwemmungsgebiete genutzt, bei denen es sich inhaltlich um die berechneten Flächen handelt, die von einem statistisch einmal in hundert Jahren stattfindenden Hochwasserereignis betroffen sind. Vor Einbeziehung in den weiteren Arbeitsprozess wurden die seitens der Unteren Wasserbehörde bereitgestellten Daten in eine geeignete Form überführt.

Neben den geschilderten Restriktionen können auch weitere real existierende Begebenheiten die Errichtung einer Wohnbebauung derart einschränken, dass eine Umsetzung an der entsprechenden Stelle als unrealistisch angesehen werden muss. Als in dieser Beziehung besonders relevant werden sowohl natürliche sowie künstlich geschaffene Gewässer als auch überörtlich bedeutsame Hauptverkehrsstraßen angesehen. Selbst wenn in einigen Fällen eine Verlagerung nicht grundsätzlich unmöglich sein muss, wird dies in dieser Arbeit als unrealistisch und nicht durchführbar unterstellt. Auch in dieser Hinsicht wirken letztlich zum Teil erhebliche normative Restriktionen, die, neben ggf. technischen, ökonomischen und legitimatorischen Schwierigkeiten, die Realisierung einer Wohnbebauung verhindern. Die eingangs angeführte Trennung zwischen normativ und real begründeten Constraints kann somit nicht immer als eindeutig differenzierende harte Grenze angesehen werden.

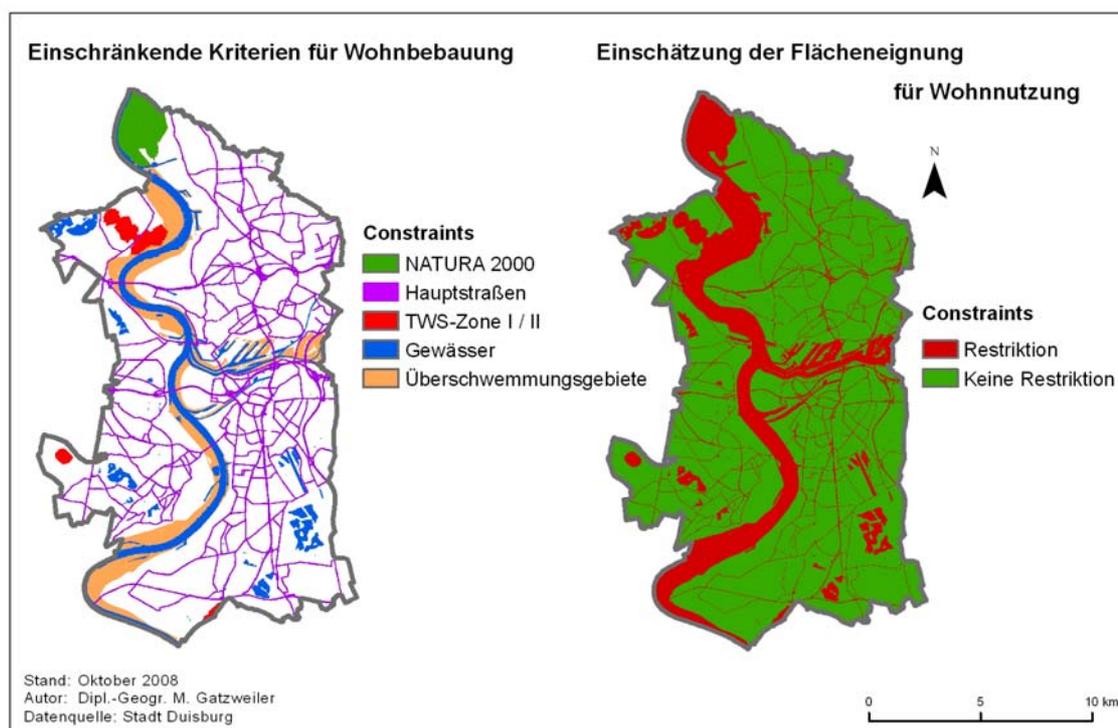
Ebenso wie die Modellierung der in den letzten Abschnitten behandelten Beurteilungskriterien an zahlreichen Stellen in Abhängigkeit von den einbezogenen Entscheidungsträgern unterschiedlich ausfallen wird, muss auch die Definition der Constraints nicht zwingend eindeutig bzw. diskussionslos sein. Gerade aufgrund des harten Ausschlusscharakters dieser Entscheidungskriterien und den daraus resultierenden potenziell erheblichen Auswirkungen auf die Entscheidungsergebnisse kommt deren Formulierung eine hohe Bedeutung und somit ggf. ein hohes Konfliktpotenzial zu. Die Einschätzung, ab wann ein Entscheidungskriterium zu einem Constraint wird, kann dabei je nach Einstellung bzw. Funktion eines Entscheidungsträgers variieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die angeführten Kriterien Gewässer, Hauptverkehrsstraßen, TWS-Zonen I und II sowie die festgesetzten Überschwemmungsgebiete und „NATURA 2000“-Gebiete als Constraints definiert.

Hinsichtlich der Datenmodellierung wird auf Basis einer binären Differenzierung die bereits in Kapitel 3.2 dargestellte Vorgehensweise verfolgt. Alle Bereiche des Untersuchungsgebiets, die unter Berücksichtigung der zugrunde gelegten Ausschlusskriterien aus der Entscheidungsfindung ausgeblendet werden sollen, erhalten die Wertzuweisung 0, alle anderen den Wert 1.

Auf verschiedene Möglichkeiten zur Kombination der in binärem Datenformat vorliegenden Informationen wurde in Kapitel 3.5.2 eingegangen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Constraints wie beschrieben so definiert, dass vorhandene Gegebenheiten die Errichtung von Wohnbebauung in einem bestimmten Gebiet unmöglich machen. Da bereits die Existenz eines dieser Kriterien ausreicht, um den entsprechenden Bereich des Stadtgebiets aus dem Entscheidungsraum auszuschließen, wird in diesem Zusammenhang die Vereinigungsmenge (Logical OR) genutzt, um eine umfassende Constraint Map zu modellieren. Insofern fließen in den weiteren Entscheidungsprozess lediglich die Alternativen ein, für die keines der Restriktionskriterien erfüllt ist.

Insgesamt ergeben sich somit innerhalb des betrachteten Untersuchungsgebiets eine Vielzahl an Flächen, die der weiteren Betrachtung durch die als Maske wirkenden Constraints entzogen werden. Abbildung 4-14 zeigt in diesem Zusammenhang einerseits die großflächigen Bereiche der Gewässer, Überschwemmungsgebiete, Trinkwasserschutzzone und „NATURA 2000“-Gebiete, andererseits die eher linearen Strukturen der Hauptverkehrsstraßen.



**Abb. 4-14: Hinleitung zur Constraint Map**

Neben diesen mittels der Constraint Map in den Entscheidungsprozess eingebundenen Restriktionen muss im Hinblick auf die verwendete räumliche Auflösung von 10 Metern berücksichtigt werden, dass die für Wohnbebauung als geeignet einzustufenden Flächen eine bestimmte Mindestgröße nicht unterschreiten sollten. Insofern wird möglicherweise je nach berechneten Ergebnissen und Detailschärfe der erforderlichen Planungsempfehlung eine weitere Differenzierung der Flächen erforderlich. Methoden der geographischen Informationsverarbeitung kann bei diesem Arbeitsschritt erneut eine hohe Bedeutung zukommen. Bei der Definition des Schwellenwerts der Flächengröße ist allerdings zu beachten, dass nicht alleine die Ausweisung großflächiger Neubaugebiete im Fokus stehen muss, sondern auch die Identifikation geeigneter Standorte zur Nachverdichtung, die nicht zwingend weiträumige Bereiche umfassen müssen.

### **4.3 Präferenzen des Entscheidungsträgers (Factor Weights)**

In den vorangegangenen Abschnitten wurden auf Basis einer Analyse der grundlegenden Entscheidungssituation die Evaluationskriterien ermittelt, die geeignet erscheinen, die zur Verfügung stehenden Alternativen im Hinblick auf die Ermittlung der aus Umweltsicht optimalen Standorte einer zukünftigen Wohnbebauung zu beurteilen. Für alle in den weiteren Entscheidungsprozess einzubeziehenden Kriterien wurden unter Berücksichtigung der jeweiligen normativen Zielsetzungen bzw. relevanten fachlichen Erfordernisse Kartenlayer modelliert, durch die, angesichts eines speziellen Grads der Zielerreichung, Aussagen über die Eignung der einzelnen Alternativen für die Realisierung einer Wohnbebauung abgeleitet werden können. Durch die Generierung dieser standardisierten Eignungskarten wurde die Basis gebildet, die unterschiedlichen Kriterien im weiteren Entscheidungsprozess zu einer umfassenden Beurteilungs- bzw. Entscheidungsgrundlage zusammenzuführen.

Die Aggregation der einzelnen Datensätze richtet sich dabei nach der hierarchisch gegliederten Struktur des Entscheidungsproblems. Zu Beginn des Kapitels 4.1 wurde die hier betrachtete Entscheidungssituation in eine derartige verhältnismäßig einfache hierarchische Struktur zerlegt (vgl. Abb. 4-1). Für jeden Zweig und jede Stufe werden im Weiteren unter Anwendung spezieller Methoden des OWA-Ansatzes die jeweiligen Datensätze zusammengeführt. Zentral ist dabei der Einbezug sowohl der Einschätzung des Entscheidungsträgers hinsichtlich der relativen Bedeutung der einzelnen Kriterien für die Erreichung des entsprechenden übergeordneten Ziels als auch seiner Präferenzen hinsichtlich des Entscheidungsrisikos und des erlaubten Trade-Off zwischen den Kriterien. Beide Gewichtungen (Factor Weights und Order Weights (vgl. Kap. 3.5.2)) werden hierzu in den weiteren Ausführungen jeweils zu bestimmen sein.

In überschaubaren Vergleichen wird die Vergabe der Factor Weights über die unmittelbare Zuweisung der Werte erfolgen, in weniger eindeutigen Fällen wird zur Ableitung robuster Gewichte auf die Methode des paarweisen Vergleichs zurückgegriffen (vgl. Kap. 3.4). Abweichend zu dem von Saaty innerhalb des AHP-Ansatzes genutzten Vorgehen werden dabei die Factor Weights nicht Hierarchieebenen übergreifend aggregiert (vgl. z. B. Saaty, 1980, S. 146 / Saaty, 2005, S. 361). Stattdessen werden die Gewichte für jeden Zweig der gegliederten Struktur separat vergeben bevor die entsprechenden Datensätze nach zu definierenden Entscheidungsregeln zusammengeführt werden und in aggregierter Form in die nächsthöhere Ebene einfließen. Auf diese Weise wird eine

Vorgehensweise verfolgt, die sich eher an der von Eastman angeführten orientiert (vgl. Eastman, 2006b, S. 122 f.).

Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich zunächst auf die Ableitung der Factor Weights, bevor im nächsten Kapitel die Order Weights einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

##### **4.3.1 Präferenzen Ebene 1**

Auf der obersten Ebene der Hierarchie (vgl. Abb. 4-1 ) gilt es zu beurteilen, welche Bedeutung den beiden Zielen „Schutz der Bevölkerung der neuen Wohngebiete vor umweltspezifischen Vorbelastungen“ und „Schutz vorhandener Umweltqualitäten vor der Beeinflussung durch eine neue Wohnbebauung“ im unmittelbaren Vergleich zukommt. So unstrittig die grundsätzliche Bedeutung beider Zielsetzungen isoliert betrachtet sein mag, so kontrovers werden die Ansichten unterschiedlicher Entscheidungsträger insbesondere dann ausfallen, wenn die Ziele einander entgegenstehen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden in diesem Zusammenhang durch die Nutzung unterschiedlicher Gewichtungen verschiedene Szenarien erzeugt. Die relative Bedeutung der beiden Kriterien wird dabei ausdrücklich in sehr hohem Maße variiert, um die Entscheidungsfindung auf Basis eines breiten Spektrums sehr kontroverser Ansichten durchzuführen. In die weiteren Modellierungen fließen somit einerseits Gewichtungen von 75:25 sowie 25:75, andererseits eine Gleichgewichtung beider Ziele von 50:50 ein. Die frei gewählten Gewichtungen werden dabei den beiden Kriterien unmittelbar zugewiesen.

##### **4.3.2 Präferenzen Ebene 2**

Auf der zweiten Ebene der Hierarchie werden die beiden angeführten Zielsetzungen in unterschiedliche Unterziele zergliedert. Entsprechend ihrer relativen Bedeutung für das jeweils übergeordnete Ziel werden für diese Unterziele unter Anwendung der in Kapitel 3.4 geschilderten Methode des paarweisen Vergleichs im Weiteren die spezifischen Gewichte ermittelt.

Wie in den jeweils zu erzeugenden Tabellen dargestellt wird, ist die Diagonale der Matrix grundsätzlich mit dem Wert 1 belegt. Die relative Bedeutung eines Kriteriums verglichen mit sich selbst ist aus nahe liegenden Gründen immer gleich ausgeprägt. Aus dem symmetrischen Aufbau der Matrix resultiert darüber hinaus, dass lediglich für eine Hälfte der Matrix die Präferenzen angegeben werden müssen. Die entsprechenden ge-

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

genüberliegenden Werte weisen jeweils den reziproken Wert auf. Die Wertevergabe erfolgt dabei unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.4 dargestellten Tabelle 3-1 und der Fragestellung, wie wichtig im Hinblick auf das jeweils zu betrachtende Ziel der jeweilige Zeilenfaktor relativ zum entsprechenden Spaltenfaktor ist.

Die technische Umsetzung des paarweisen Vergleichs erfolgte unter Anwendung des in der Software IDRISI-Andes implementierten Moduls „WEIGHT“. Die Eingangsdaten können den beiden folgenden Tabellen entnommen werden. Die letzten Spalten geben die über die Eigenwertmethode berechneten Gewichte (Factor Weights) der Kriterien wieder, die unterste Zeile enthält die für die Einschätzung der Zuverlässigkeit der abgegebenen paarweisen Vergleiche erforderlichen Angaben. Sofern das Konsistenzverhältnis einen Wert von kleiner 0,1 aufweist, können die Ergebnisse als akzeptabel angesehen werden (vgl. Kap. 3.4).

Zunächst werden die Gewichte der Kriterien bestimmt, die für das Ziel „Schutz vor umweltspezifischen Vorbelastungen“ als relevant erachtet wurden.

**Tab. 4-3: Definition der Factor Weights im Themenfeld Vorbelastungen**

<b>Ziel: Schutz vor umweltspezifischen Vorbelastungen</b>					
	<b>Bodenveränderungen</b>	<b>Verkehrslärm</b>	<b>Gewerbeemissionen</b>	<b>Luftschadstoffe</b>	<b>Gewicht</b>
<b>Bodenveränderungen</b>	1				<b>0,11</b>
<b>Verkehrslärm</b>	3	1			<b>0,35</b>
<b>Gewerbeemissionen</b>	2	1/2	1		<b>0,19</b>
<b>Luftschadstoffe</b>	3	1	2	1	<b>0,35</b>
<b>Konsistenzverhältnis</b>	<b>CR = 0,00</b> d. h. Konsistenz ist akzeptabel				

Die in Tabelle 4-3 zum Ausdruck gebrachten Einschätzungen beruhen dabei auf den folgenden Überlegungen.

Grundsätzlich kann für alle betrachteten Umweltthemen eine gesundheitsbeeinträchtigende Relevanz unterstellt werden. Eine allgemeingültige wissenschaftlich fundierte Ableitung des Ausmaßes der Gesundheitsgefährdung eines Belangs verglichen mit dem eines anderen, erscheint jedoch angesichts der hohen Heterogenität der betrachteten Themen kaum realisierbar. Insofern wurden für eine Berücksichtigung innerhalb der notwendigerweise zu vollziehenden Abwägung an dieser Stelle Annahmen getroffen, in welchem Ausmaß die jeweiligen Vorbelastungen durch entsprechende Maßnahmen ab-

gemildert bzw. beseitigt werden können. Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass dem paarweisen Vergleich nicht nur ebenso andere Annahmen hätten zugrunde gelegt werden können (z. B. auf Erfahrungswerten beruhende durchschnittlich erwartbare Kosten zur Durchführung der Maßnahmen), sondern aus den angestellten Überlegungen auch andere Konsequenzen für die konkrete Vergabe der Werte hätten gezogen werden können. Hingewiesen sei zusätzlich darauf, dass die tatsächliche Qualität der für diese Arbeit verfügbaren Datengrundlagen, im Gegensatz zur grundsätzlichen Datenkonzeption (Abstandserlass), keinen Niederschlag in der Gewichtung gefunden hat.<sup>20</sup>

Die in Tabelle 4-3 angegebenen Einschätzungen bilden letztlich das Ergebnis eines iterativen Prozesses, an dessen Ende durch verschiedene geringfügige Überarbeitungen, ein akzeptables Konsistenzverhältnis erreicht wurde.

Im Bereich der hier betrachteten schädlichen Bodenveränderungen besteht je nach konkretem Umfang der Belastungen auf verschiedene Weise die Möglichkeit, eine dauerhaft uneingeschränkte Nutzbarkeit der relevanten Flächen wieder herzustellen. Im schlechtesten Fall kann selbst bei erheblichen Belastungen mit allen betrachteten Schadstoffen durch eine Abschiebung und Entsorgung der betroffenen oberen Bodenschichten bzw. deren Abdeckung mit unbedenklichem Material eine sichere Nutzung auch der sensiblen Teilflächen mit verhältnismäßig geringem Aufwand gewährleistet werden.

Im Gegensatz dazu werden die Chancen, eine Fläche umfassend von erheblichen Schallimmissionen zu entlasten, in vielen Fällen als deutlich geringer unterstellt. Zwar können durch passive Maßnahmen, wie z. B. Schallschutzfenster, oft hohe Minderungen erzielt werden, dennoch kann ein derartiger Schutz nur sehr eingeschränkt wirken, da er sich vor allem auf die Innenbereiche bei geschlossenen Fenstern bezieht. Die für die Lebensqualität oftmals nicht unerheblichen Außenbereiche einer Wohnnutzung lassen sich auf diese Weise nicht schützen. Hierzu geeignete aktive Maßnahmen, wie die Errichtung von Lärmschutzwänden, sind in innerstädtischen Gebieten jedoch häufig nicht realisierbar.

---

<sup>20</sup> Andernfalls hätten gerade die beiden hoch gewichteten Kriterien Verkehrslärmemissionen und Luftschadstoffe aufgrund der erheblichen Datenlücken des erstgenannten und der großteils sehr geringen räumlichen Auflösung des letztgenannten Kriteriums deutlich geringer gewichtet werden müssen. Auf der anderen Seite hätte das Gewicht des Bodenbelangs aufgrund der verhältnismäßig guten Datengrundlage deutlich höher ausfallen müssen, so dass sich insgesamt Factor Weights ergeben hätten, die eine vollständig andere Modellierung bedeuten würden als die der skizzierten Überlegungen entsprechende. Vor diesem Hintergrund wurde für die vorliegende Arbeit unterstellt, dass die zur Anwendung gebrachten verfügbaren Datengrundlagen ein angemessenes Bild der tatsächlichen Situation wiedergeben.

Diese angestellten Überlegungen lassen sich sowohl auf Verkehrslärm als auch auf durch Gewerbebetriebe verursachte Schallemissionen beziehen. Berücksichtigt werden sollte jedoch zudem, dass es sich bei den Angaben zum Verkehrslärm um berechnete Werte auf Grundlage von die konkreten Situationen modellierender Ausgangsdaten handelt, während die Empfehlungen des Abstandserlasses prinzipiell pauschale Aussagen ohne Bezug zur speziellen Situation darstellen. Auch wenn durch die Abstandsempfehlung neben den Lärmemissionen auch Auswirkungen durch andere Beeinträchtigungen wie Gerüche und Luftschadstoffe einbezogen werden, werden in dieser Arbeit die Verkehrsemissionen im unmittelbaren Vergleich zu den Gewerbeemissionen als geringfügig bedeutender angesehen.

Hinsichtlich der Luftschadstoffe wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass die Möglichkeit zum Schutz der Wohnbevölkerung vor derartigen Belastungen, zumindest im Außenbereich, ebenfalls als relativ gering bzw. ungesichert anzusehen ist. Im Gegensatz zum Bodenbereich wird die Wahrscheinlichkeit, dass durch entsprechende örtlich begrenzte Maßnahmen (z. B. intensive Straßenbegrünung oder die Vermeidung von Straßenschluchten durch die geplante Bebauung) dauerhaft eine Gesundheitsgefährdung ausgeschlossen werden kann, als geringer angesehen. Wirksame Maßnahmenbündel können, angesichts der erheblichen Hintergrundbelastungen zumindest im hier relevanten Untersuchungsgebiet, weniger auf das kleinräumige Gebiet einer konkreten geplanten Wohnnutzung beschränkt bleiben, sondern müssen auf einer großräumigen ggf. sogar überkommunalen Ebene im Rahmen eines Luftreinhalteplans ansetzen. Diese Problematik einer kleinräumig weitgehenden Handlungsunfähigkeit verbunden mit den für das relevante Untersuchungsgebiet erkennbaren weiträumig hohen Hintergrundbelastungen könnte von anderen Entscheidungsträgern durchaus auch als Begründung angesehen werden, den Belang relativ gering zu gewichten.

Auch wenn nicht nur im Hinblick auf diesen Umweltbelang intensive Diskussionen über die zu nutzenden Factor Weights möglich wären, werden im Rahmen dieser Arbeit die in Tabelle 4-3 angegebenen Gewichtungen den weiteren Berechnungen zugrunde gelegt.

Auch hinsichtlich des zweiten zu berücksichtigenden Ziels dieser Hierarchieebene, dem „Schutz vorhandener Umweltqualitäten“, werden die Factor Weights unter Anwendung der Methode des paarweisen Vergleichs vergeben.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

---

Analog zum vorangegangenen Vorgehen werden in Tabelle 4-4 die im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzten Einschätzungen zur relativen Bedeutung der einzelnen Beurteilungskriterien, die daraus resultierenden Gewichtungen sowie die Angaben zum Konsistenzverhältnis dargestellt. Im Weiteren werden die Annahmen angeführt, auf deren Grundlage die getroffenen Einschätzungen basieren.

**Tab. 4-4: Definition der Factor Weights im Themenfeld Umweltqualitäten**

<b>Ziel: Schutz vorhandener Umweltqualitäten</b>				
	<b>Freiraumschutz</b>	<b>Naturschutz</b>	<b>Trinkwasserschutz</b>	<b>Gewicht</b>
<b>Freiraumschutz</b>	1			<b>0,25</b>
<b>Naturschutz</b>	3	1		<b>0,59</b>
<b>Trinkwasserschutz</b>	1/2	1/3	1	<b>0,16</b>
<b>Konsistenzverhältnis</b>	<b>CR = 0,05</b> d. h. Konsistenz ist akzeptabel			

Bei dem Vergleich der relativen Bedeutung der Umweltthemen Freiraumschutz und Naturschutz wird letzterem in dieser Arbeit eine höhere Bedeutung eingeräumt. Der mit den zumeist gesetzlich definierten Schutzwürdigkeiten spezieller Gebiete verbundene Raumwiderstand wird hier als bedeutender angesehen, als der mit der genutzten Form der Datenmodellierung verfolgte allgemeine Freiraumschutz.

Für beide Belange wird allerdings in dieser Arbeit unterstellt, dass sie in hohem Maße beeinträchtigt werden, sobald auf diesen Flächen eine Wohnnutzung etabliert wird. Selbst wenn über das Instrument der Eingriffsregelung (vgl. BNatSchG, §§ 18-21 / Weiland/Wohlleber-Feller, 2007, S. 255 ff.) ein Hilfsmittel angeboten wird, um bestimmte Teile der zu erwartenden Auswirkungen zu kompensieren, wird in dieser Arbeit für die jeweils betroffenen Flächen davon ausgegangen, dass eine Vereinbarkeit der umweltspezifischen Ziele mit einer Wohnnutzung nicht gewährleistet ist. Die Realisierung einer Wohnbebauung in diesen Bereichen bedeutet somit, zumindest in hohem Maße, die gesicherte Aufgabe der umweltspezifischen Ziele.

Demgegenüber muss die Errichtung neuer Wohngebiete das Ziel Trinkwasserschutz nicht zwingend konterkarieren. Durch entsprechende Maßnahmen zur Versickerung des beispielsweise auf den Dachflächen anfallenden unbelasteten Niederschlagswassers über die belebte Bodenzone kann die negative Auswirkung einer erhöhten Versiegelung auf die Grundwasserneubildung verringert werden ohne die Gefahren für seine Qualität erheblich zu erhöhen. Durch die Formulierung weiterer Auflagen, beispielsweise hinsichtlich der Nutzung wassergefährdender Stoffe (z. B. durch ölbetriebene Heizungsan-

lagen), kann zudem die durch bestimmte Faktoren drohende Gefahr erheblicher Auswirkungen auf die Qualität des Grundwassers reduziert werden. Vor diesem Hintergrund wird somit in dieser Arbeit die relative Bedeutung des Belangs Trinkwasserschutz als verhältnismäßig gering angesehen.

Im Gegensatz zu dieser Einschätzung würden andere Entscheidungsträger möglicherweise den Schutz der menschlichen Gesundheit als zentralen Belang einstufen und somit dem Trinkwasserschutz ein deutlich höheres Gewicht einräumen als den beiden anderen betrachteten Umweltthemen.

Ausdrücklich sei insofern erneut darauf hingewiesen, dass die im Rahmen der paarweisen Vergleiche durchgeführte Beurteilung der relativen Bedeutung der einbezogenen Entscheidungskriterien in hohem Maße auf subjektiven Einschätzungen beruht, deren Motivationen jedoch durch die angeführten Überlegungen weitgehend transparent dargelegt wurden. Das besondere Potenzial der Methode des paarweisen Vergleichs liegt dabei nicht zuletzt in der Möglichkeit, die individuell getroffenen Einschätzungen unterschiedlicher einbezogener Entscheidungsträger als Basis eines auf die relevanten Aspekte konzentrierten strukturierten Diskussionsprozesses zu nutzen, an dessen Ende entweder eine konsensuelle Wertevergabe oder eine näher zu bestimmende gewichtete Zusammenführung der Einzelwerte steht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte ein derartiger wünschenswerter Prozess allerdings nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurden die aus den innerhalb der Tabellen 4-3 und 4-4 angegebenen Einschätzungen resultierenden Gewichtungen den weiteren Berechnungen zugrunde gelegt.

#### **4.3.3 Präferenzen Ebene 3**

Auf der dritten Hierarchiestufe sind nur im Hinblick auf wenige Umweltthemen Daten gewichtet zu aggregieren. Die meisten Umweltziele der zweiten Hierarchiestufe basieren im Rahmen der vorliegenden Arbeit z. T. sehr vereinfachend lediglich auf einem einzigen Entscheidungskriterium (vgl. Abb. 4-1). In einer umfassenderen Modellierung der Entscheidungssituation würde die entsprechende hierarchische Gliederung an verschiedenen Stellen deutlich komplexer ausfallen. Beispielsweise könnte ein Ziel „Schutz vor Lärm“ formuliert werden, das, sofern auf entsprechende Datengrundlagen zurückgegriffen werden kann, weiter untergliedert ist in Verkehrslärm, Gewerbelärm und Sport- und Freizeitlärm, denen wiederum jeweils unterschiedliche Datensätze zugewiesen sind (z. B. Straßenlärm, Schienenlärm, Schiffslärm jeweils basierend auf Tag-

und Nachtwerten). Auch in Bezug auf andere Umweltbelange wäre denkbar, den Grad der jeweiligen Zielerreichung anhand verschiedener Kriterien zu messen.

Im vorliegenden Fall wird jedoch lediglich hinsichtlich zweier Umweltthemen eine dritte Hierarchieebene modelliert, auf der mehrere Datensätze gewichtet zusammenzuführen sind. Zum einen basiert das Ziel „Schutz vor Luftschadstoffen“ sowohl auf Daten zu NO<sub>2</sub> als auch zu PM10, zum anderen fließt in das Ziel „Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen“ die Betrachtung der Konzentrationen unterschiedlicher Stoffe (Arsen, Benzo(a)pyren, Blei und Cadmium) ein. In beiden Fällen wurden aufgrund der in dieser Arbeit unterstellten Überschaubarkeit der jeweiligen Entscheidungssituation die Factor Weights unmittelbar zugewiesen.

Im Hinblick auf die Aggregation der bodenspezifischen Eignungskarten kann durch die Vergabe der Factor Weights die Bedeutung der einzelnen Stoffe innerhalb der resultierenden Gesamteignungskarte Boden beeinflusst werden. Sofern von einem Stoff eine größere Gesundheitsgefahr ausgeht als von einem anderen, wäre auf diese Weise dessen relative Bedeutung innerhalb der Modellierung entsprechend zu erhöhen.

Im vorliegenden Fall sind alle betrachteten Stoffe bei hinreichender Dosierung in hohem Maße als giftig und krebserregend einzustufen. Eine Differenzierung der Gesundheitsgefährdung bei direktem Bodenkontakt erscheint jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit ohne detaillierte humantoxikologische Beurteilungsgrundlagen nicht möglich. Zusätzlich müsste unter Berücksichtigung des Wirkungspfads Boden-Nutzpflanze die tatsächliche Pflanzenverfügbarkeit der jeweiligen Stoffe innerhalb des Bodens als bedeutend für das spezifische Gefährdungsmaß angesehen werden. Von Relevanz ist hierfür nicht zuletzt die spezielle lokale Beschaffenheit des Bodenumfelds wie z. B. der pH-Wert oder die Bodenart (vgl. Hiller/Meuser, 1998, S. 77 ff., 94 ff.). Auch zu diesem Themenfeld liegen keine detaillierten Informationen vor.

Insgesamt wird aus den angeführten Gründen für die weitere Bearbeitung von einer identischen Gesundheitsgefährdung der einzelnen Schadstoffe und somit einer Gleichgewichtung (d. h. jeweils 0,25) der Kriterien im Hinblick auf das Ziel „Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen“ ausgegangen. Dennoch bietet die grundsätzliche Möglichkeit zur differenzierten Gewichtung prinzipiell ein großes Potenzial dieser Herangehensweise.

Eine vergleichbare Vorgehensweise kann auch hinsichtlich des Ziels „Schutz vor Luftschadstoffen“ verfolgt werden. In die Entscheidungsfindung einbezogen werden zum einen Daten zu Feinstaub (PM10), zum anderen Daten zu Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>). Über die kriterienspezifische Gewichtung besteht auch in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, die relative Bedeutung der beiden Stoffe innerhalb der zu erzeugenden Gesamteignungskarte Luftschadstoffe zu beeinflussen.

Trotz Recherche konnten jedoch keine Informationen ermittelt werden, die in Abhängigkeit von der spezifischen Gesundheitsgefährdung eine fundierte differenzierte Gewichtung der beiden Luftschadstoffe begründet hätte. Entsprechend wurden auch in diesem Themenbereich die Factor Weights der beiden Kriterien gleich ausgeprägt (d. h. jeweils 0,5).

Angesichts des in der jüngeren Vergangenheit durch den Europäischen Gerichtshof eingeräumten Rechts des einzelnen Bürgers, die Gemeinde des Wohnortes notfalls mit juristischen Mitteln zur Aufstellung von Aktionsplänen gegen eine zu hohe Feinstaubbelastung zu veranlassen, könnte im Gegensatz zu dem hier gewählten Vorgehen von einigen Entscheidungsträgern, unter Aufweitung einer rein gesundheitlich motivierten Zielsetzung, durchaus auch befürwortet werden, dem Feinstaub eine (deutlich) höhere relative Bedeutung zukommen zu lassen.

Insgesamt wurden somit in den letzten Abschnitten für alle Ebenen und Zweige der hierarchischen Struktur (vgl. Abb. 4-1) die kriterienspezifischen Gewichtungen bestimmt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzt werden sollen. Wie angeführt wird auf diese Weise die relative Bedeutung bestimmt, die den einzelnen Kriterien zur Erreichung des jeweils übergeordneten Ziels durch den jeweiligen Entscheidungsträger zugeordnet wird. In den folgenden Abschnitten werden die Order Weights als zweite wesentliche Gewichtungsart behandelt.

### **4.4 Entscheidungsregeln (Order Weights)**

Die im letzten Abschnitt definierten Factor Weights geben an, in welchem Ausmaß ein Kriterium ein anderes Kriterium ausgleichen kann. Hoch gewichtete Kriterien können demnach geringe Werte anderer Kriterien leichter ausgleichen als gering gewichtete Kriterien. Die im Folgenden zu behandelnden Order Weights definieren demgegenüber den von dem Entscheidungsträger präferierten Grad an einbezogenem Entscheidungsrisiko, aber auch in welchem Maße der Trade-Off zwischen den Kriterien prinzipiell stattfinden soll. Vor allem die Order Weights sind somit ausschlaggebend für die im Weiteren zu betrachtende Aggregation der einzelnen bislang erzeugten Eignungskarten zu aggregierten Entscheidungsgrundlagen. Durch sie wird die Entscheidungsstrategie bzw. Entscheidungsregel definiert, nach der sich die Zusammenführung der jeweiligen Daten richtet. Die theoretischen Grundlagen zum OWA-Ansatz wurden in Kapitel 3.5.2 behandelt.

Die Aggregation der Eignungskarten wird dabei wie beschrieben der in Kapitel 4-1 definierten hierarchisch gegliederten Struktur der Entscheidungssituation folgen. Die Auseinandersetzung mit den Order Weights beginnt dabei am unteren Ende der Entscheidungs pyramid, da die auf den unteren Stufen gebildeten Aggregationen jeweils in die höhere Ebene einfließen.

#### **4.4.1 Datenaggregation Ebene 3**

##### **4.4.1.1 Eignungskarte auf Basis der schädlichen Bodenveränderungen**

Auf der zunächst betrachteten dritten Aggregationsebene wird die Zusammenführung der Daten mit dem Themenfeld der schädlichen Bodenveränderungen begonnen. Im Weiteren werden unter Berücksichtigung der festgesetzten Factor Weights (vgl. Kap.4.3.3) die bodenspezifischen standardisierten Eignungskarten mittels verschiedener Aggregationsmethoden zu jeweils einer Gesamteignungskarte schädliche Bodenveränderungen (Boden) zusammengeführt. Hierzu werden zunächst die drei rahmensetzenden Methoden des OWA-Ansatzes (MIN, MAX und WLC) genutzt, um im Anschluss die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im vorliegenden Zusammenhang zu beurteilen.

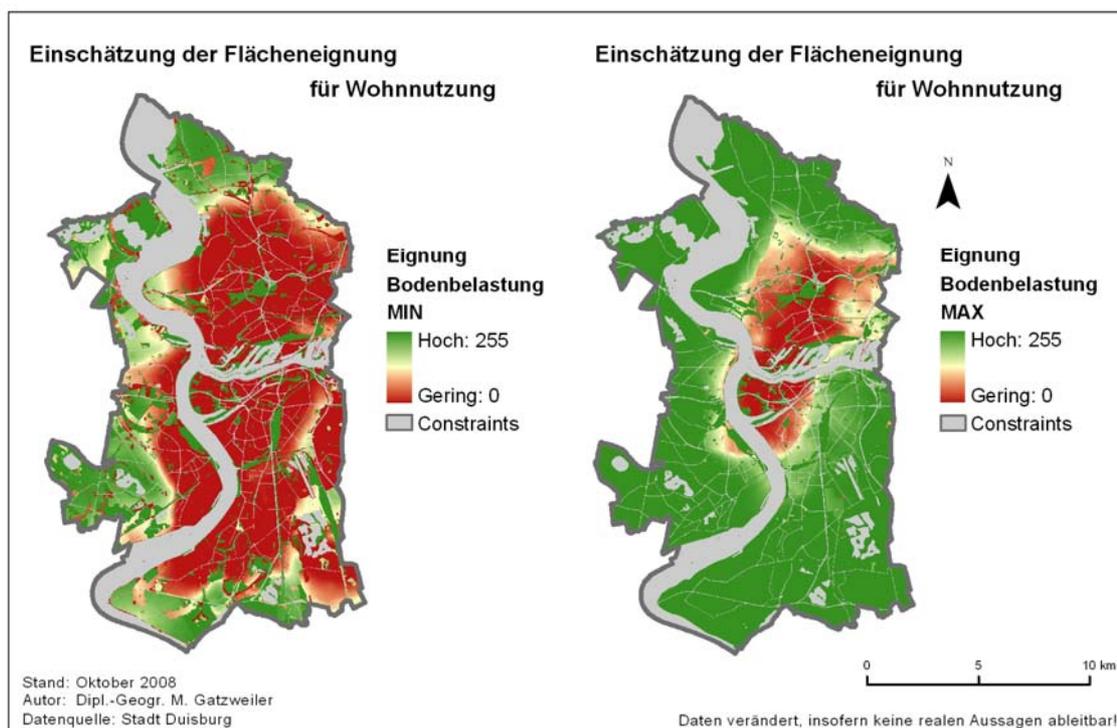
Zunächst werden die beiden im Hinblick auf das einbezogene Risiko extrem gegensätzlichen Entscheidungsregeln MIN und MAX angewendet. Beiden Aggregationsmetho-

den ist jedoch gemeinsam, dass sie keinen Trade-Off zwischen den einbezogenen Kriterien zulassen.

Unter Nutzung der MIN-Entscheidungsregel, d. h. Order Weights von [1/0/0/0], wird der Gesamteignungswert der aggregierten Boden-Eignungskarte für jede Alternative allein durch den geringsten Eignungswert der einbezogenen Kriterien bestimmt. Daraus folgt, dass alle einbezogenen entscheidungsrelevanten Kriterien mindestens über Eignungswerte verfügen, die dem Ausgewiesenen entsprechen. Auf diese Weise wird ein sehr risikoaverses Szenario erzeugt, da lediglich die Alternativen eine hohe Gesamteignung zugewiesen bekommen, für die alle schadstoffspezifischen Eignungskarten einen hohen Wert aufweisen. Abbildung 4-15 zeigt, dass hinsichtlich der durch Arsen, Blei, Benzo(a)Pyren und Cadmium verursachten schädlichen Bodenveränderungen lediglich ein geringer Anteil des Stadtgebiets über eine mittlere bis hohe Eignung verfügt. Für den Großteil des Untersuchungsgebiets muss die Eignung im Hinblick auf den Schutz der Bevölkerung vor schädlichen Bodenveränderungen auf Basis von mindestens einem der betrachteten Schadstoffe als gering angesehen werden.

Auf der anderen Seite des Risikospektrums wird die aggregierte Gesamteignungskarte Boden unter Anwendung der MAX-Entscheidungsregel bestimmt durch Order Weights von [0/0/0/1]. Jeder Alternative wird somit der größte Eignungswert der einbezogenen Kriterien zugrunde gelegt. Unabhängig von der Wertausprägung der anderen Schadstoffe wird eine Alternative folglich immer dann mit einer hohen Gesamteignung ausgewiesen, wenn eine solche für mindestens einen der betrachteten Stoffe berechnet wurde. Die Entscheidung für eine Alternative zur Etablierung einer Wohnnutzung ist somit bei einer Orientierung an der resultierenden Ergebniskarte als sehr risikoreich anzusehen, da keine Gewähr besteht, dass die ausgewiesene Eignung für alle Schadstoffe Gültigkeit besitzt. Umgekehrt kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die Flächen, die über eine geringe Gesamteignung verfügen, hinsichtlich aller betrachteten Kriterien eine geringe Eignung aufweisen.

Abbildung 4-15 stellt die aus den beiden dargestellten Entscheidungsregeln resultierenden Gesamteignungskarten einander gegenüber. Während in dem Worst-Case-Szenario (links) nur ein sehr geringer Anteil des Stadtgebiets über eine mittlere bis hohe Gesamteignung verfügt, weist die maximal optimistische Sicht (rechts) für einen Großteil des Untersuchungsgebiets eine hohe Eignung aus.



**Abb. 4-15: Gesamteignungskarten Bodenbelastung: MIN / MAX**

Im vorliegenden Zusammenhang wird eine mit der MAX-Methode verbundene sehr optimistisch motivierte Aggregation der Bodendaten angesichts des hohen Entscheidungsrisikos und den daraus resultierenden unkalkulierbaren potenziellen gesundheitlichen Auswirkungen als nicht sachgemäß angesehen und aus diesem Grund nicht weiter verfolgt.

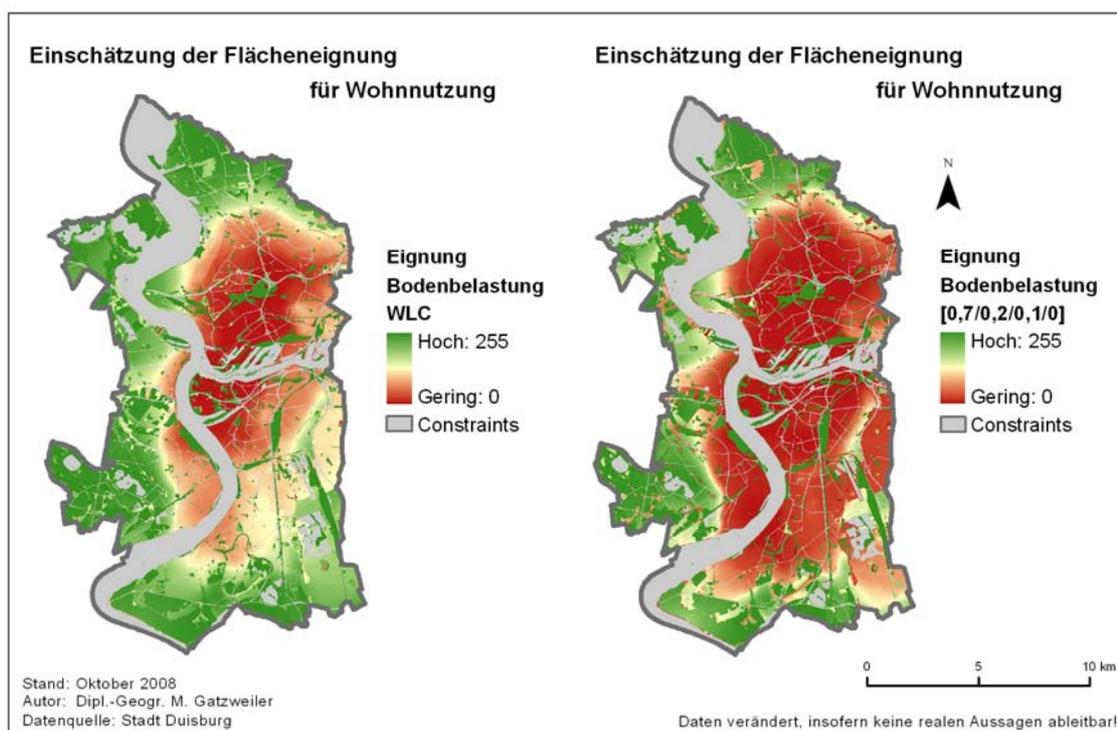
Demgegenüber erscheint die über die MIN-Methode berechnete Gesamteignungskarte deutlich nutzbarer, da eine Überschätzung der Flächeneignung und somit die Gefahr unberücksichtigter gesundheitlicher Auswirkungen durch die extrem hohe Risikoaversion ausgeschlossen wird. Im Sinne einer größtmöglichen Sicherheit wäre demnach eine derart aggregierte Bodenkarte in die nächsthöhere Ebene der Entscheidungshierarchie einzubeziehen.

Allerdings zeigt Abbildung 4-15 sehr eindrücklich, dass auf diese Weise innerhalb des Untersuchungsgebiets eine Eignung für Wohnbebauung nahezu flächendeckend abgesprochen werden muss. Zudem muss beachtet werden, dass bei einer derartigen Modellierung eine Fläche, die für einen einzelnen Schadstoff Prüfwertüberschreitungen aufweist, genauso schlecht beurteilt wird, wie eine Fläche, die gleichzeitig für alle betrachteten Kriterien derartige Überschreitungen aufweist. Um eine solche in der Realität nicht unerhebliche Differenzierung in der Modellierung zu berücksichtigen, sollte ein

Trade-Off zwischen den Kriterien in einer näher zu definierenden Höhe einbezogen werden.

Im Gegensatz zu den beiden bisher angeführten Entscheidungsregeln lässt die im Weiteren zu betrachtende WLC-Methode nicht nur einen Trade-Off zwischen den einbezogenen Kriterien zu, sondern ist in dieser Hinsicht auch als extrem anzusehen. Die Order Weights weisen jedem Kriterium das einheitliche Gewicht  $1/n$  zu, d. h. im vorliegenden Fall ein Gewicht von 0,25. Da für die Faktor Weights ebenfalls eine Gleichgewichtung definiert wurde (ebenfalls 0,25 vgl. Kap. 4.3.3), wird die Gesamteignung bestimmt durch das arithmetische Mittel der einbezogenen Kriterien. Auf diese Weise besteht jedoch die hier im Vordergrund stehende Gefahr, dass negative Ausreißer in dem berechneten Durchschnittswert untergehen. So wird beispielsweise eine Fläche, die hinsichtlich dreier Schadstoffe als unbedenklich (Eignung von 255), im Hinblick auf einen Schadstoff jedoch aufgrund einer Prüfwertüberschreitung als ungeeignet (Eignung von 0) anzusehen ist, unter Anwendung der WLC-Methode in der hier genutzten Modellierung mit dem Gesamtwert von 191,3 und somit einer unzulässig hohen Eignung ausgewiesen. Aufgrund dieser mit einer Unterschätzung negativer Extremwerte verbundenen Gefahr muss die WLC-Methode im vorliegenden Zusammenhang mit Vorsicht bedacht werden. Ausschlaggebend hierfür ist das hohe Maß an Trade-Off, verbunden mit einer mittleren Risikobereitschaft.

Abbildung 4-16 zeigt auf der linken Seite die unter Anwendung der WLC-Methode generierte Gesamteignungskarte Boden. Im Vergleich zu den beiden im Vorfeld erstellten Karten lässt sich erkennen, dass die berechneten Einschätzungen hinsichtlich der Flächeneignung für die Nutzungsform Wohnen in vielen Fällen in einem mittleren Bereich angesiedelt sind.



**Abb. 4-16: Gesamteignungskarten Bodenbelastung: WLC / OWA [0,7/0,2/0,1/0]**

Vor dem Hintergrund der eingeschränkten Einsetzbarkeit der bislang behandelten Entscheidungsregeln bietet die hohe Flexibilität des OWA-Ansatzes die an dieser Stelle sinnvoll nutzbare Möglichkeit, eine für den konkreten Anwendungszusammenhang angemessene Entscheidungsregel zu konstruieren. Unter Berücksichtigung der letzten Ausführungen sollte diese vom Grundsatz her innerhalb des in Abbildung 3-4 dargestellten „Decision Rule Space“ zwischen der WLC- und der MIN-Methode verortet sein. Die konkrete Aggregationsmethode wird dabei im Hinblick auf eine hohe Entscheidungssicherheit (hohe Risikoaversion) so konzipiert, dass dem niedrigsten Eignungswert die größte Bedeutung zukommt, gleichzeitig aber den nächsthöheren Eignungswerten eine mit zunehmender Eignung abnehmende Möglichkeit zum Trade-Off geboten wird. Zahlreiche Order-Weight-Kombinationen sind in dieser Hinsicht realisierbar, in der vorliegenden Arbeit werden den weiteren Berechnungen jedoch die Order Weights [0,7/0,2/ 0,1/0] zugrunde gelegt.<sup>21</sup>

Auf diese Weise bestimmt der niedrigste Eignungswert die Gesamteignung zu mehr als zwei Dritteln, während die beiden nächsthöheren Werte in geringem und zusätzlich abnehmendem Maße in die Gesamteignung einfließen. Das Kriterium mit der besten Eignung

<sup>21</sup> Auf der nächsten Ebene der Entscheidungspyramide werden mehrere individuell konstruierte OWA-Entscheidungsregeln miteinander verglichen. Im Hinblick auf den Umfang der vorliegenden Arbeit wird auf dieser untersten Hierarchieebene allerdings für die beiden Themenfelder (Boden und Luft) nur jeweils eine Regel in die Betrachtung einbezogen.

nung wird demgegenüber vollkommen unberücksichtigt gelassen. Insgesamt handelt es sich also um eine sehr risikoaverse Entscheidungsregel, die jedoch die im Vorfeld angeführte Beschränkung der MIN-Entscheidungsregel zu einem bestimmten Teil überwindet. Bezogen auf das oben angeführte Beispiel würde bei einer einzelnen Prüfwertüberschreitung (d. h. einem Eignungswert von 0) und drei unter den einbezogenen Hintergrundwerten liegenden Werten (d. h. einer Eignung von 255) der schlechteste Wert das Ergebnis so stark beeinflussen, dass lediglich ein Wert von 76,5 und somit eine sehr geringe Gesamteignung erreicht werden kann. Dennoch besteht durch den einbezogenen Trade-Off, wenn auch nur in geringem Maße, die Möglichkeit, eine Differenzierung von Flächen zuzulassen, für die mehrere Werte eine geringe Eignung aufweisen. Durch Variation der Order Weights kann das Ausmaß einer solchen Differenzierung frei gestaltet werden.

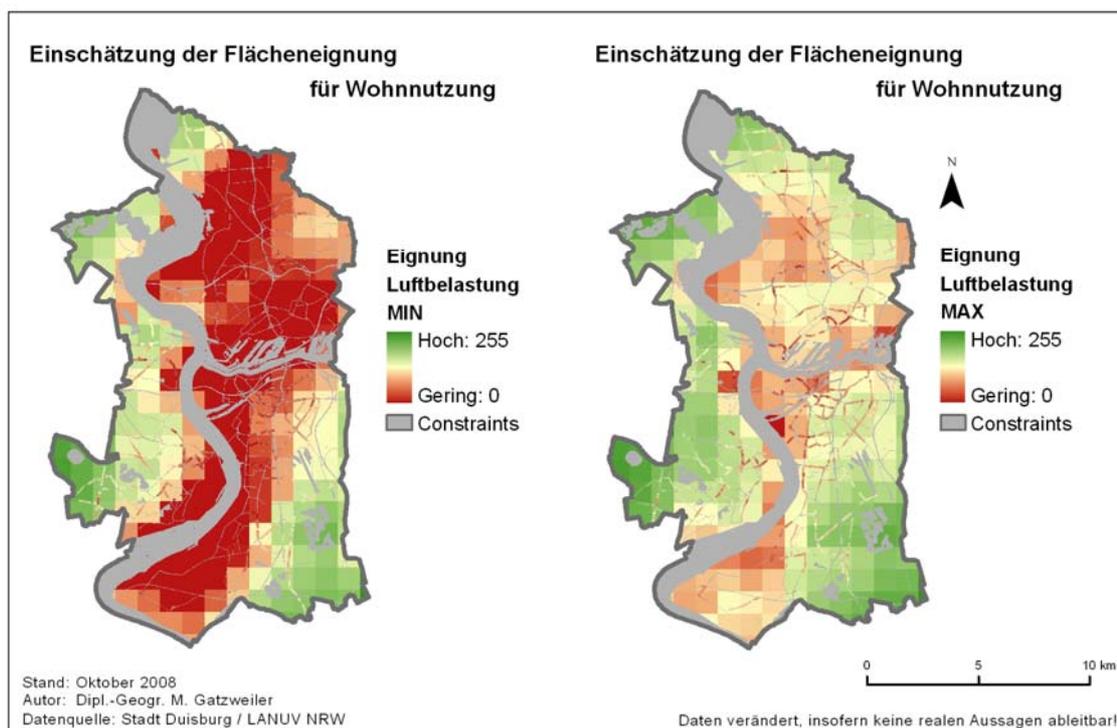
Abbildung 4-16 stellt auf der rechten Seite die aus den genannten Order Weights resultierende Gesamteignungskarte Boden dar. Erwartungsgemäß lässt sich eine große Ähnlichkeit mit der über die MIN-Methode aggregierten Gesamteignungskarte erkennen, allerdings zeigen sich dieser gegenüber, aufgrund des Einbezugs des geringen Trade-Off zwischen den Kriterien, an zahlreichen Stellen leichte Abmilderungen der schlechten Einstufungen.

Insgesamt wird offensichtlich, dass auch die Auswahl der Entscheidungsregel keineswegs objektiv eindeutig bestimmbar ist, sondern in hohem Maße u. a. von den durch den Entscheidungsträger subjektiv eingeschätzten Erfordernissen der Entscheidungssituation abhängt. Insofern kann auch dieser Aspekt erhebliches Diskussionspotenzial im Rahmen des Entscheidungsprozesses bieten.

##### **4.4.1.2 Eignungskarte auf Basis der Luftschadstoffe**

Neben den bodenspezifischen Belangen sind auf der dritten Hierarchiestufe im Hinblick auf das übergeordnete Ziel „Schutz vor Luftschadstoffen“ auch die im Vorfeld generierten standardisierten Eignungskarten zu den beiden in dieser Arbeit betrachteten Aspekten Feinstaub und Stickstoffdioxid zu einer Gesamteignungskarte Luftschadstoffe zu aggregieren.

Das hierbei verfolgte Vorgehen entspricht dem des in den letzten Abschnitten angeführten. Zunächst werden demnach die schadstoffspezifischen Eignungskarten unter Anwendung der MIN- und der MAX-Entscheidungsregel zusammengeführt. Abbildung 4-17 stellt die jeweiligen Ergebnisse einander gegenüber.



**Abb. 4-17: Gesamteignungskarten Luftschadstoffe: MIN / MAX**

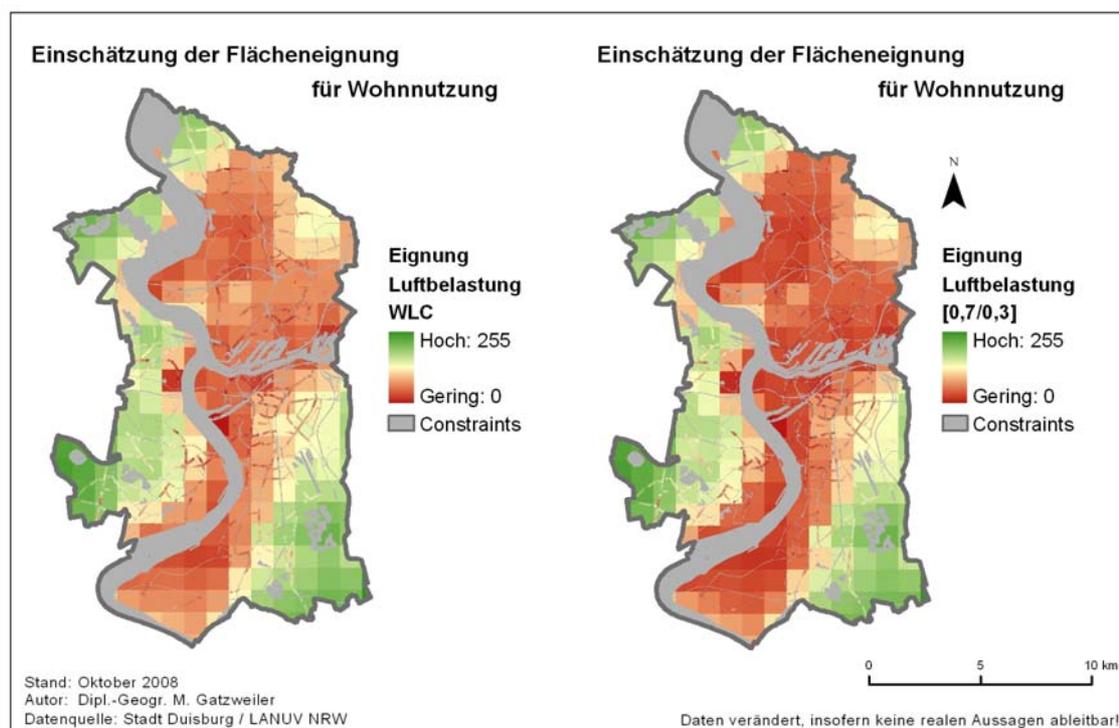
Auf der linken Seite der Abbildung 4-17 zeigt sich, dass unter Einbezug des kleinstmöglichen Entscheidungsrisikos (MIN) innerhalb eines von Südwesten nach Nordosten verlaufenden breiten Gürtels eine allenfalls geringe Eignung für die Etablierung von Wohnnutzung besteht. Unabhängig von der Ausprägung des zweiten betrachteten Schadstoffs ist somit für mindestens einen der beiden (PM<sub>10</sub> oder NO<sub>2</sub>) von einer sehr geringen Eignung auszugehen. Lediglich in einigen äußeren Bereichen des Untersuchungsgebiets lässt sich unter Berücksichtigung der Luftschadstoffe eine mittlere bis höhere Eignung erkennen.

Die rechte Seite der Abbildung 4-17 zeigt demgegenüber die maximal optimistische Einschätzung der Flächeneignung für eine Wohnnutzung unter Anwendung der MAX-Entscheidungsregel. In diesem höchst riskanten Szenario wird eine Fläche immer dann mit einer hohen Eignung versehen, sobald eine solche für einen der betrachteten Faktoren gilt. Unter dieser Annahme lässt sich für einen deutlich größeren Bereich des Untersuchungsgebiets eine weniger schlechte Eignung erkennen, wenngleich nach wie vor die Konturen des oben beschriebenen diagonal verlaufenden Gürtels größtenteils deutlich erkennbar sind. Hieraus ist ersichtlich, dass auf Basis der gewählten Datenmodellierung selbst bei optimistischer Sicht in weiten Teilen des Stadtgebiets bestenfalls eine mittlere Eignung für Wohnbebauung vorherrscht.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

Insgesamt wird allerdings, analog zum Vorgehen im Bereich der Bodenschadstoffe, die Anwendbarkeit der MAX-Entscheidungsregel im Rahmen der hier betrachteten Fragestellung aufgrund der Unkalkulierbarkeit der gesundheitlichen Belastungen als ungeeignet angesehen. Die mit der MIN-Methode verbundene höhere Sicherheit wird demgegenüber unter Berücksichtigung des zu erreichenden Ziels „Schutz vor Luftschadstoffen“ als deutlich angemessener eingestuft. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass die Gesamteignung einer Fläche für Wohnbebauung anders einzuschätzen ist, wenn lediglich ein Schadstoff hohe Werte aufweist (und somit in dieser Hinsicht zu einer geringen Eignung führt), als wenn dies gleichzeitig für beide Schadstoffe der Fall ist. Entsprechend sollte auch in diesem Themenbereich ein gewisser Trade-Off in die Modellierung einbezogen werden, um die Möglichkeit zu gewährleisten, eine derart differenzierte Information zur Flächeneignung in die Entscheidung einfließen zu lassen.

Abbildung 4-18 zeigt auf der linken Seite die Einschätzung der Flächeneignung unter Anwendung gleich gewichteter Order Weights (1/n, d. h. 0,5), wodurch das Ergebnis dem der WLC-Methode entspricht.



**Abb. 4-18: Gesamteignungskarten Luftschadstoffe: WLC / OWA [0,7/0,3]**

Da, ähnlich wie im Themenbereich Boden, die Factor Weights zuvor mit identischem Gewicht belegt wurden (0,5), stellt das Gesamtergebnis das arithmetische Mittel der

einbezogenen Daten dar. Hieraus ergibt sich die gleiche Problemlage wie im vorangegangenen Abschnitt. Dadurch, dass zur Generierung der Gesamteignungskarte Luftschadstoffe der Durchschnitt der beiden schadstoffspezifischen Eignungskarten gebildet wird, kann die nicht unerhebliche Gefahr bestehen, dass niedrige Eignungswerte auf Basis des einen Schadstoffs durch hohe sich aus dem anderen Schadstoffs ergebende Eignungswerte so stark kompensiert werden, dass die Gesamteignung letztlich überschätzt wird. Vor diesem Hintergrund muss der auf diese Weise in die Modellierung einbezogene Trade-Off als zu groß angesehen werden.

Insofern wird auch in diesem Themenfeld über die Beeinflussung der Order Weights von der Flexibilität des OWA-Ansatzes Gebrauch gemacht, um eine angemessenere Datenmodellierung zu erzeugen. Das anvisierte Ziel ist dabei, eine tendenziell risikoaverse Entscheidungsregel zu konzipieren, durch welche die generierte Gesamteignung so stark von dem schlechtesten Wert bestimmt wird, dass der Einbezug des zweiten Werts selbst bei maximaler Ausprägung keine die Eignung überbewertende Fehlentscheidung erzeugen kann. Dennoch soll die Möglichkeit bestehen, unter Berücksichtigung des Gesamteignungswerts eine beide Schadstoffe einbeziehende Information in die Entscheidung einfließen zu lassen. Da innerhalb der Software IDRISI die Order Weights frei und kontinuierlich bestimmt werden können, lassen sich auch in diesem Themenbereich zahlreiche Kombinationen finden, durch welche eine derartige Zielsetzung als erfüllt angesehen werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Order Weights  $[0,7/0,3]$  genutzt und das hieraus resultierende Ergebnis den weiteren Arbeitsschritten zugrunde gelegt. Auf diese Weise besteht zudem der Vorteil, dass eine gewisse Vergleichbarkeit zu der im Bodenbereich erzeugten Gesamteignungskarte besteht.

Das aus dieser Entscheidungsregel erzeugte Ergebnis kann der Abbildung 4-18 entnommen werden. Erwartungsgemäß lässt sich eine hohe Ähnlichkeit mit den aus der WLC- und der MIN-Methode resultierenden Ergebnissen beobachten, wobei die Gesamteignungswerte der zuletzt genutzten Methode überwiegend in einem mittleren Bereich angeordnet sind.

### 4.4.2 Datenaggregation Ebene 2

Auf der zweiten Hierarchieebene werden einerseits die einzelnen Datensätze zum Themenbereich Vorbelastungen, andererseits die zum Themenbereich Umweltqualitäten zu einem jeweils einheitlichen Datensatz zusammengefügt (vgl. Abb. 4-1). Da sich die letzten Abschnitte bereits mit den boden- und luftschadstoffspezifischen Vorbelastungen beschäftigt haben, wird mit diesem Zweig des Entscheidungsbaums begonnen.

#### 4.4.2.1 Eignungskarte auf Basis der Vorbelastungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit basiert das Ziel „Schutz vor umweltspezifischen Vorbelastungen“ auf insgesamt vier Unterzielen, dem Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen, verkehrlichen Schallemissionen, gewerblichen Emissionen und Luftschadstoffen.

In den bisher erfolgten Arbeitsschritten wurde für jedes der angeführten Themenfelder eine standardisierte Eignungskarte erstellt, wobei diese im Bereich Boden- und Luftschadstoffe bereits das Ergebnis einer in den letzten Abschnitten dargestellten Aggregation der jeweiligen Daten der dritten Hierarchieebene ist. Die relative Bedeutung, die den einzelnen Unterzielen zur Erreichung des übergeordneten Ziels zukommt, wurde über die Definition der Factor Weights für diese Arbeit festgelegt.<sup>22</sup>

Im Weiteren werden die vier Eignungskarten unter Anwendung verschiedener Entscheidungsregeln zu einer übergreifenden Karte zusammengeführt, in der die Flächeneignung für Wohnbebauung unter Berücksichtigung aller betrachteten Vorbelastungen dargestellt wird. Durch Variation der Order Weights werden dabei in Abhängigkeit von dem Grad des einbezogenen Entscheidungsrisikos und Trade-Off unterschiedliche Szenarien generiert.

Im Hinblick auf die Auswahl der Aggregationsregeln wurde auch auf dieser Hierarchieebene zunächst auf die drei rahmensetzenden Order-Weight-Kombinationen MIN, WLC und MAX zurückgegriffen. Bei der Anwendung der in Bezug auf die Risikobereitschaft maximal ausgeprägten Entscheidungsregel (MAX) wird offenbar, dass der Großteil des Untersuchungsgebiets als sehr geeignet eingestuft wird. Da diese Beurteilung ungeachtet der übrigen Werte lediglich auf dem jeweils besten Eignungswert beruht, wird, analog zu den Ausführungen in den vorangegangenen Abschnitten, aufgrund der von den

---

<sup>22</sup> Im Gegensatz zu der obersten Ebene des Entscheidungsbaums werden auf dieser zweiten Hierarchieebene die Factor Weights für beide betrachteten Äste entsprechend der zuvor definierten Gewichte konstant gehalten. Eine Variation der Gewichte auf dieser Ebene würde den Umfang der vorliegenden Arbeit bei Weitem sprengen.

übrigen Vorbelastungen ausgehenden unkalkulierbaren gesundheitlichen Gefahren eine Nutzung dieser Entscheidungsregel für die hier relevante Fragestellung als nicht geeignet angesehen. Stattdessen werden nur Aggregationsverfahren in die nähere Betrachtung einbezogen, die über eine zumindest mittlere Risikoaversion verfügen, wobei dem im Einzelfall gesundheitsbedrohlichsten Belang (hier definiert als das Kriterium für das jeweils die geringste Eignung berechnet wurde) das höchste Gewicht zukommen sollte. Hinsichtlich des Ausmaßes des einzubeziehenden Trade-Off ist anzuführen, dass streng genommen die gesundheitlichen Auswirkungen eines höheren Lärmpegels nicht durch die einer geringeren Belastung durch Luft- oder Bodenschadstoffe kompensiert werden. Allenfalls könnten in bestimmten Fällen die mehr oder weniger hohen finanziellen Aufwendungen für Maßnahmen zur Abkehr gesundheitlicher Auswirkungen einander kompensieren. Allerdings ist ein Standort, der „nur“ im Hinblick auf ein Umweltthema erhöhte Vorbelastungen zu verzeichnen hat je nach konkreter Werteausprägung häufig als weniger gesundheitsschädlich zu beurteilen als ein Standort, für den gleichzeitig bezogen auf mehrere Kriterien eine Eignung abgesprochen werden muss. Vor diesem Hintergrund sollte auch in diesem Themenfeld ein Trade-Off in einer näher zu bestimmenden Höhe in die Modellierung einbezogen werden

Das Maß beider Elemente, Risikobereitschaft und Trade-Off, wurde somit im Hinblick auf den in Kapitel 3.5.2 dargestellten „Decision-Rule-Space“ (vgl. Abb. 3-4) so variiert, dass, bis auf die bereits angeführte MAX-Methode, alle Entscheidungsregeln zwischen der MIN- und der WLC-Methode verortet sind.

Im Anschluss an die extrem risikoaverse MIN-Entscheidungsregel wurde, analog zu den vorangegangenen Abschnitten, zunächst eine Methode gewählt, die noch eine relativ niedrige Risikobereitschaft und einen verhältnismäßig geringen lediglich drei Kriterien einbeziehenden Trade-Off aufweist  $[0,7/0,2/0,1/0]$ . Bei der nächsten Methode wurde der Trade-Off auf alle vier Kriterien ausgeweitet, wobei sich die Risikoaversion nur geringfügig verringert  $[0,65/0,2/0,1/0,05]$ . Mit der vierten Entscheidungsregel  $[0,5/0,25/0,15/0,1]$  wurde der Trade-Off zu Lasten des ersten Faktors, und somit auch der Risikoaversion, weiter gesteigert, bis dieser letztlich im Rahmen der WLC-Methode bei mittlerem Risiko maximal wird.

Die Ergebnisse dieser Modellierungen können den folgenden Abbildungen entnommen werden.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

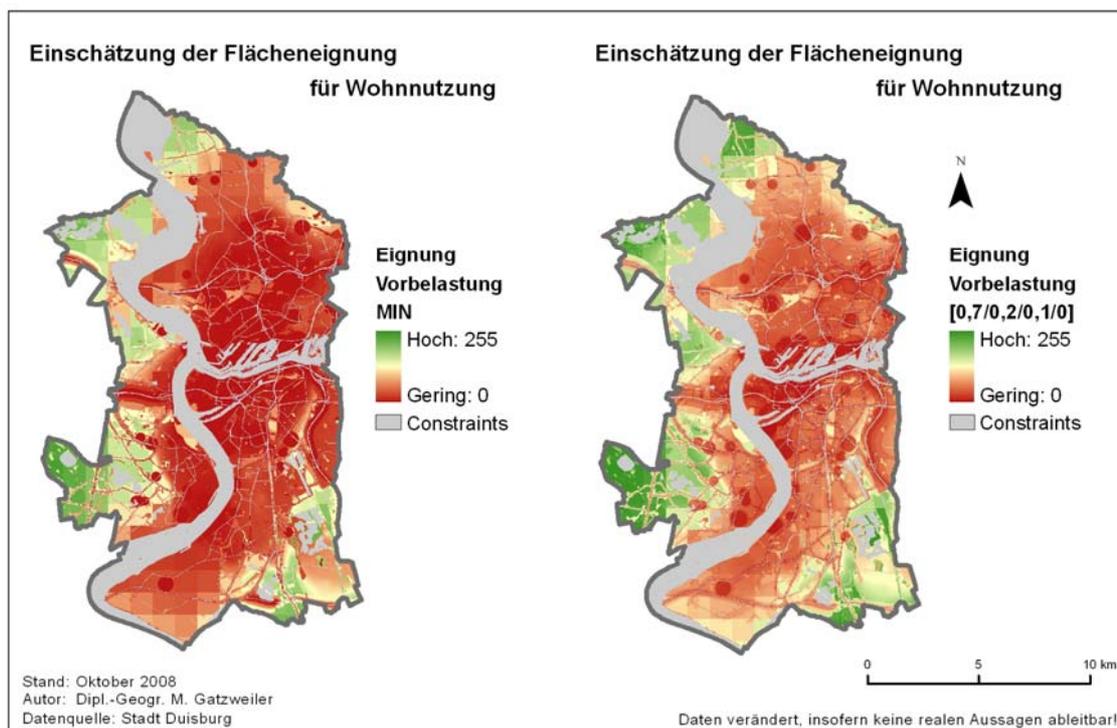


Abb. 4-19: Eignungskarten Vorbelastung: MIN / OWA [0,7/0,2/0,1/0]

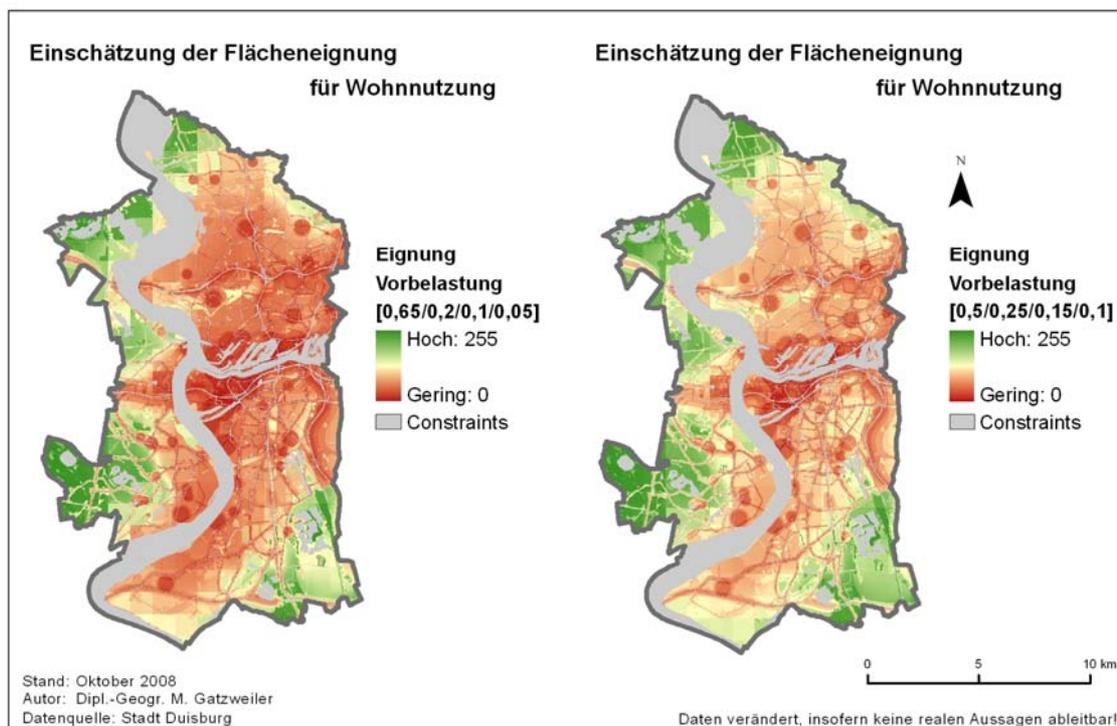
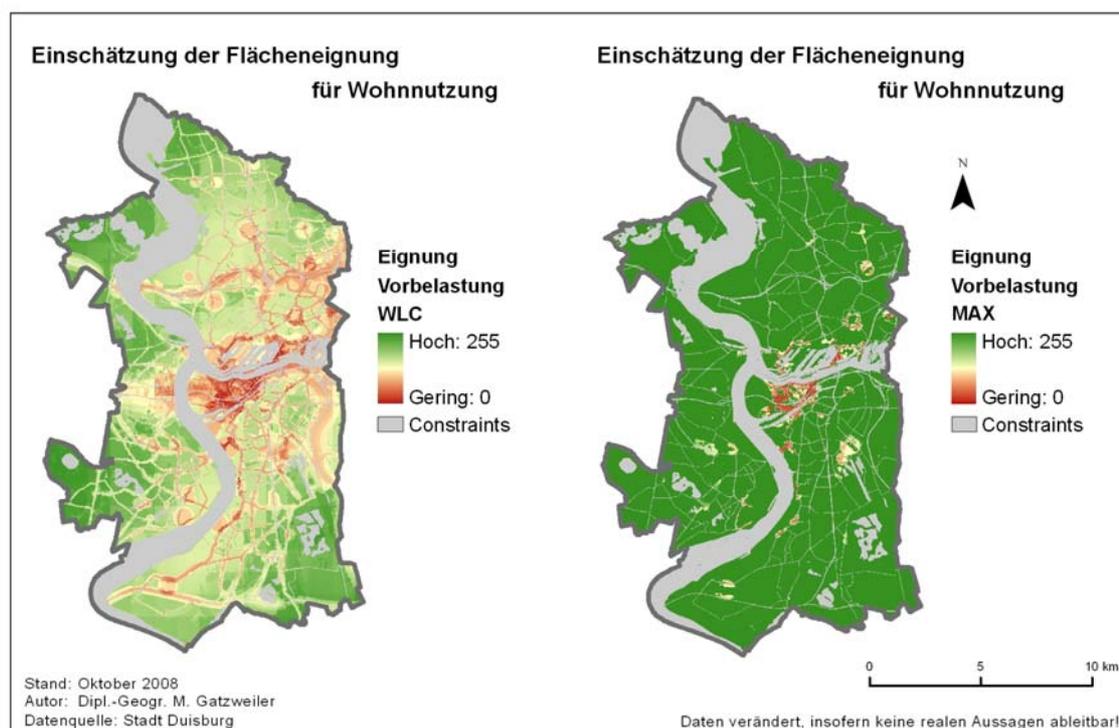


Abb. 4-20: Eignungskarten Vorbelastung: OWA [0,65/0,2/0,1/0,05] / OWA [0,5/0,25/0,15/0,1]



**Abb. 4-21: Eignungskarten Vorbelastung: WLC / MAX**

Bei der Betrachtung der Eignungskarten zeigt sich, dass mit zunehmender Risikobereitschaft und überwiegend steigendem Trade-Off die mit einer hohen Eignung ausgewiesenen Flächen deutlich zunehmen. Die Flächen mit den höchsten Eignungswerten finden sich dabei in größeren Bereichen des westlichen Untersuchungsgebiets sowie in Teilen des Nordens und Südostens. Von diesen Gebieten ausgehend weiten sich bei abnehmender Risikoaversion und steigendem Trade-Off nicht selten die positiv beurteilten Flächen weiter aus. Trotz des zwischen der WLC- und der MAX-Methode wieder gesunkenen Trade-Off, lässt sich bei Anwendung der letztgenannten Entscheidungsregel für den Großteil des Untersuchungsgebiets die im Vorfeld bereits angeführte höchst riskante Einstufung einer hohen Eignung für Wohnnutzung erkennen.

Tabelle 4-5 stellt für die verschiedenen Szenarien die flächigen und prozentualen Ergebnisse dar. Auch wenn auf diese Weise die räumliche Information über die tatsächliche Verortung der jeweiligen Flächeneignungen verloren geht, wird hierdurch ein guter Überblick über die quantitativen Dimensionen der berechneten Eignungswerte geboten. Zur übersichtlicheren Präsentation wurden die in dem Bereich von 0 bis 255 vorliegenden Eignungswerte in Quintile klassifiziert und mit den interpretativ leicht nutzbaren Kategoriebezeichnungen „Sehr hohe Eignung“, „Hohe Eignung“, „Moderate Eignung“, „Geringe Eignung“ und „Sehr geringe Eignung“ belegt. Hingewiesen sei dabei jedoch

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

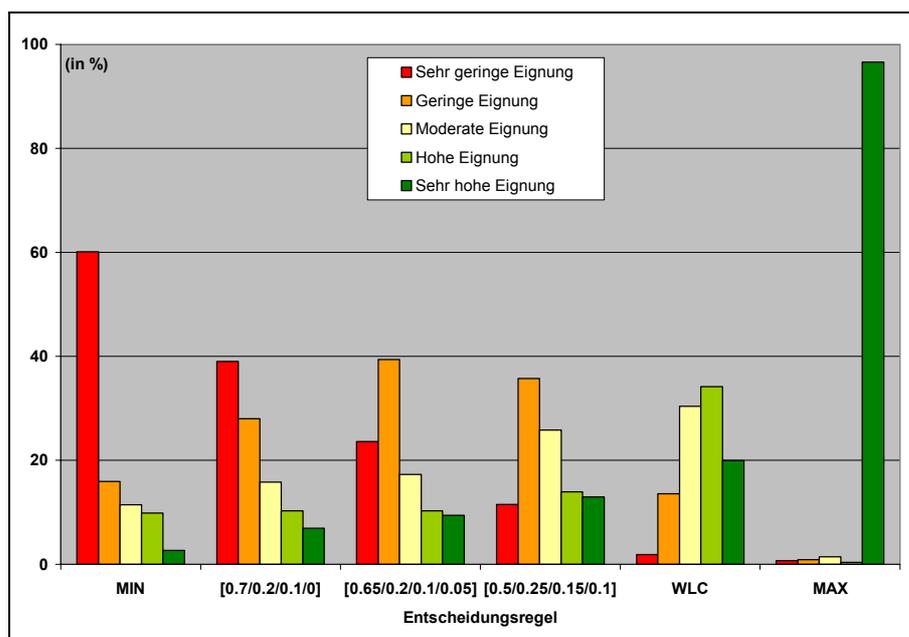
darauf, dass durch eine derartige Definition diskreter Klassen der kontinuierliche Wertebereich mit künstlichen Grenzen versehen wird. Eine mit dem Eignungswert 205 versehene Fläche ist, trotz Klassengrenze, lediglich als geringfügig geeigneter anzusehen als eine Fläche mit dem Wert 204, allerdings, trotz gleicher Klasse, im Verhältnis deutlich weniger geeignet als eine Fläche mit dem Wert 255. Auch wenn für die weiteren Berechnungen die kontinuierlichen Werte genutzt werden, sei für die folgende Darstellung aus Übersichtlichkeitsgründen auf die definierten diskreten Klassen zurückgegriffen.

Das in dieser Arbeit betrachtete Untersuchungsgebiet weist eine berücksichtigte Gesamtfläche von 232,6 km<sup>2</sup> auf, wobei 56,1 km<sup>2</sup> von den als Constraint definierten Beschränkungen betroffen sind. Daraus folgt, dass insgesamt eine Fläche von 176,5 km<sup>2</sup> im Blickfeld der Suche nach geeigneten Wohnstandorten steht.

**Tab. 4-5: Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Vorbelastungen)**

		MIN	OWA [0,7 / 0,2 / 0,1 / 0]	OWA [0,65 / 0,2 / 0,1 / 0,05]	OWA [0,5 / 0,25 / 0,15 / 0,1]	WLC	MAX
<b>Sehr geringe Eignung</b>	km <sup>2</sup>	106,16	68,9	41,7	20,38	3,3	1,25
	%	60,13	39,04	23,62	11,54	1,87	0,71
<b>Geringe Eignung</b>	km <sup>2</sup>	28,14	49,39	69,54	63,07	23,92	1,51
	%	15,94	27,98	39,39	35,73	13,55	0,86
<b>Moderate Eignung</b>	km <sup>2</sup>	20,2	27,89	30,5	45,62	53,7	2,55
	%	11,44	15,8	17,28	25,84	30,42	1,45
<b>Hohe Eignung</b>	km <sup>2</sup>	17,34	18,11	18,16	24,56	60,39	0,7
	%	9,83	10,26	10,29	13,91	34,21	0,4
<b>Sehr hohe Eignung</b>	km <sup>2</sup>	4,7	12,23	16,63	22,9	35,21	170,52
	%	2,66	6,93	9,42	12,97	19,95	96,59

Zur besseren Vergleichbarkeit stellt das folgende Diagramm zusätzlich für die zur Anwendung gebrachten hier aufgezeigten Entscheidungsregeln die prozentualen Werte der klassifizierten Flächeneignungen einander gegenüber.



**Abb. 4-22: Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Vorbelastungen)**

Bei der Betrachtung von Tabelle 4-5 und Abbildung 4-22 zeigt sich sehr einprägsam das auch in den kartographischen Darstellungen zu verfolgende Phänomen des gegenläufigen Verlaufs der (extremen) Werteausprägungen. Während die Flächen mit sehr geringer Eignung mit zunehmender Risikobereitschaft in erheblichem Maße abnehmen, weisen die als sehr geeignet definierten Flächen eine deutliche Zunahme auf. Insgesamt lässt sich, der Abszisse des Diagramms von der MIN- zur MAX-Methode folgend, eine sukzessive Entwicklung beobachten, in der sich die Anteile der niedrigen Eignungsklassen zunehmend zu den Anteilen der hohen Eignungsklassen verschieben.

Von besonderem Interesse ist auch der unmittelbare Vergleich der von links aus betrachtet zweiten und dritten Entscheidungsregel. Obwohl die Order Weights durch die geringfügige Verringerung des ersten Gewichts zu Gunsten des letzten lediglich marginal verändert wurden, ist in der diskreten Klasseneinteilung ein deutlicher Sprung zwischen den beiden unteren Klassen zu beobachten.

An dieser Stelle zeigt sich nicht zuletzt der Einfluss eines alle vier Kriterien einbeziehenden Trade-Off auf die Gesamtbeurteilungswerte. Mit der vierten Entscheidungsregel wird dieser weiter gesteigert, indem zu Lasten des ersten Order Weights die übrigen erhöht werden. Im Ergebnis weitet sich der Flächenanteil der mittleren und höheren Eignungskategorien weiter aus. Bei maximalem Trade-Off und gleichzeitig mittlerem Risiko (WLC) lässt sich nur noch eine untergeordnete Bedeutung der weniger geeigneten Flächen beobachten. Niedrige Wertigkeiten im Hinblick auf bestimmte Kriterien

können hierbei in maximalem Maße durch hohe Wertigkeiten anderer Kriterien kompensiert werden.

Angesichts dieser Beobachtungen sollten bedeutende für diese Ergebnisse verantwortliche Einflussfaktoren näher beleuchtet werden. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass für den Bereich der verkehrlichen Lärmemissionen für weite Teile des Untersuchungsgebiets aufgrund der bestehenden Datenlücken sehr vereinfachend eine maximale Eignung modelliert wurde. Ebenso lassen sich im Hinblick auf die ebenfalls nur selektiv verfügbaren gewerblichen Emissionen großflächige Eignungswerte von 255 erkennen. Zusammen betrachtet ist nahezu für jede Fläche des Untersuchungsgebiets für mindestens ein Kriterium eine sehr hohe Eignung gegeben, wobei vor allem die Modellierung der verkehrlichen Emissionen die Realität nur unzureichend abbildet.

Vor diesem Hintergrund lassen sich insbesondere das Ergebnis der MAX-Methode, unter zusätzlichem Einbezug der Factor Weights (relativ hohes Gewicht der Lärmemissionen sowie in Summe beider Kriterien eine relative Bedeutung von mehr als 50%) aber auch das der WLC-Methode sowie die auffällige Veränderung der Beurteilungswerte bei Einbezug des vierten Kriteriums erklären.

Auch wenn die beschriebenen Datenlücken bewusst nicht bei der Vergabe der Factor Weights berücksichtigt wurden, besteht durch die Bestimmung der Order Weights die Möglichkeit, diesem Mangel in gewissem Umfang entgegenzuwirken. Durch eine Beschränkung der Betrachtung auf die niedrigsten Eignungswerte können die häufig unzutreffend hohen Eignungswerte aus der Beurteilung ausgeblendet werden.

Insgesamt soll angesichts der betrachteten Fragestellung („Schutz vor umweltspezifischen Vorbelastungen“) im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein möglichst risikoaverses Aggregationsverfahren genutzt werden, wobei im Hinblick auf die Beschränkungen der MIN-Entscheidungsregel gleichzeitig jedoch zumindest ein gewisser Trade-Off einbezogen werden soll. Vor dem Hintergrund aller angeführten Aspekte wird an dieser Stelle eine Entscheidungsregel gewählt, die lediglich die drei niedrigsten Eignungswerte mit in zunehmendem Maße sinkendem Gewicht berücksichtigt. Für die weiteren Berechnungen wird somit auf den aus der zweiten Entscheidungsregel [0,7/0,2/0,1/0] resultierenden Datensatz zurückgegriffen. Hingewiesen sei aber darauf, dass ebenso wie an zahlreichen anderen Stellen grundsätzlich auch Argumente für eine andere Wahl hätten angeführt werden können.

##### **4.4.2.2 Eignungskarte auf Basis der Umweltqualitäten**

Im Themenbereich der Umweltqualitäten baut innerhalb der vorliegenden Arbeit das zweite auf dieser Hierarchieebene angesiedelte Ziel „Schutz vorhandener Umweltqualitäten“ auf insgesamt drei Unterzielen auf. Für alle drei Unterziele Freiraumschutz, Naturschutz und Trinkwasserschutz wurden im Vorfeld standardisierte Eignungskarten generiert, die im Weiteren unter Berücksichtigung der bereits definierten Factor Weights und noch zu bestimmender Order Weights zu einer übergreifenden Karte zusammengeführt werden. In der auf diese Weise generierten Karte wird die Eignung der einzelnen Flächenalternativen für Wohnnutzung vor dem Hintergrund aller betrachteten Umweltqualitäten beurteilt.

Analog zum Vorgehen im Themenbereich der Vorbelastungen werden durch Variation der Order Weights verschiedene Szenarien erstellt, wobei die Ausgestaltung der Gewichte von den folgenden Überlegungen geleitet wird.

Streng genommen muss bei den im Themenfeld der Umweltqualitäten behandelten Kriterien die Modellierung eines zwischen diesen bestehenden Trade-Off zunächst kritisch beleuchtet werden. Während im Bereich der Vorbelastungen bei jedem einbezogenen Kriterium die Gesundheit der in den entsprechenden Gebieten wohnenden Menschen betrachtet wird, stehen im Zusammenhang der Umweltqualitäten sehr unterschiedliche Schutzgüter im Blickfeld, wodurch die ohnehin schwierige Vergleichbarkeit zusätzlich erschwert wird. Die Möglichkeit, dass beispielsweise eine erhöhte Grundwassergefährdung innerhalb eines hydrologisch relativ abgegrenzten Einzugsgebiets durch die Unversehrtheit eines in einem vollkommen anderen Bereich des Untersuchungsraums vertorten Naturschutzgebiets kompensiert wird, erscheint in diesem Beispiel im Hinblick auf das Schutzgut Wasser als zweifelhaft. Insofern müsste vor diesem Hintergrund grundsätzlich von einem Trade-Off zwischen den Kriterien abgesehen werden (vgl. Eastman, 2006b, S. 122). Die Auswahl der Entscheidungsregel würde sich demnach unter Berücksichtigung des in Abbildung 3-4 dargestellten „Decision-Rule-Space“ auf die auf der Abszisse liegenden Aggregationsregeln beschränken. Im Hinblick auf die Order Weights würde somit das volle Gewicht auf immer nur einem Kriterium liegen, wodurch sich in Abhängigkeit von der einzubeziehenden Risikobereitschaft lediglich die MIN-Methode [1/0/0], die MAX-Methode [0/0/1] oder die Median-Methode [0/1/0] ergäben.

Da im Rahmen der Stadtplanung jedoch notwendigerweise auch grundsätzlich nicht vergleichbare Aspekte in der Abwägung zusammengeführt und einander gegenübergestellt werden müssen, wird auch in der vorliegenden Arbeit eine dieses Erfordernis aufgreifende Herangehensweise weiter verfolgt. Entsprechend wird ein Trade-Off in einer näher zu bestimmenden Höhe in die Modellierung einbezogen, um die Möglichkeit zu bieten auch hinsichtlich der Umweltqualitäten zu differenzieren, ob eine Fläche auf Basis „nur“ eines Kriteriums oder gleichzeitig mehrerer Kriterien beispielsweise als ungeeignet angesehen werden muss.

In Bezug auf das einzubeziehende Risiko muss berücksichtigt werden, dass auch im Bereich der Umweltqualitäten eine hohe Risikobereitschaft dazu führt, dass geringe Eignungswerte weniger stark in die Gesamtbeurteilung einfließen als hohe Eignungswerte, wodurch der Zielsetzung „Schutz der vorhandenen Umweltqualitäten“ weniger gut entsprochen würde. Insofern soll auch in diesem Themenbereich eine tendenziell höhere Risikoaversion modelliert werden, durch die gleichzeitig dem jeweils schutzbedürftigsten Belang (also dem Kriterium, für das im Einzelfall die geringste Eignung berechnet wurde) das größte Gewicht zukommen soll.

Als Konsequenz aus den angeführten Überlegungen werden die folgenden Entscheidungsregeln zur Anwendung gebracht und deren Ergebnisse im Anschluss vergleichend gegenübergestellt.

Zunächst wurde auch in diesem Themenfeld mit der MIN-Methode die risikofeindlichste Entscheidungsregel genutzt. Im Anschluss wurden sukzessive Risikobereitschaft und Trade-Off bis zur WLC-Methode gesteigert. Während zunächst der Trade-Off bei hoher Risikoaversion auf die ersten beiden Kriterien beschränkt wurde  $[0,7/0,3/0]$ , wird dieser mit den nächsten beiden Aggregationsverfahren auf alle drei Kriterien ausgeweitet. Dies geschieht in einem Fall in geringfügigem Maße auf Kosten des ersten  $[0,65/0,3/0,05]$ , in einem weiteren Fall auf Kosten des zweiten Gewichts  $[0,7/0,2/0,1]$ . Durch deutliche Verringerung des ersten zu Gunsten des letzten Order Weights wird die Risikobereitschaft in der folgenden Entscheidungsregel in größerem Maße erhöht  $[0,5/0,3/0,2]$ . Die derart betriebene Angleichung der Order Weights und somit auch des Trade-Off zwischen den Kriterien wird im Weiteren innerhalb der WLC-Methode maximal. Abschließend wird, trotz der angeführten Beschränkung im Hinblick auf die themenspezifische Anwendbarkeit, die MAX-Methode angewandt, um auch in diesem Bereich des „Decision Rule Space“ (vgl. Abb. 3-4) die extreme Ausprägung aus Gründen der Vergleichbarkeit aufzuzeigen.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

Die folgenden Abbildungen stellen die Ergebnisse dieser Modellierung in Kartenform dar. Da sich die aus den Order-Weight-Kombinationen  $[0,7/0,2/0,1]$  und  $[0,65/0,3/0,05]$  ergebenden Resultate in hohem Maße ähneln, wurde auf die Abbildung der aus der letztgenannten Kombination resultierenden Eignungskarte verzichtet.

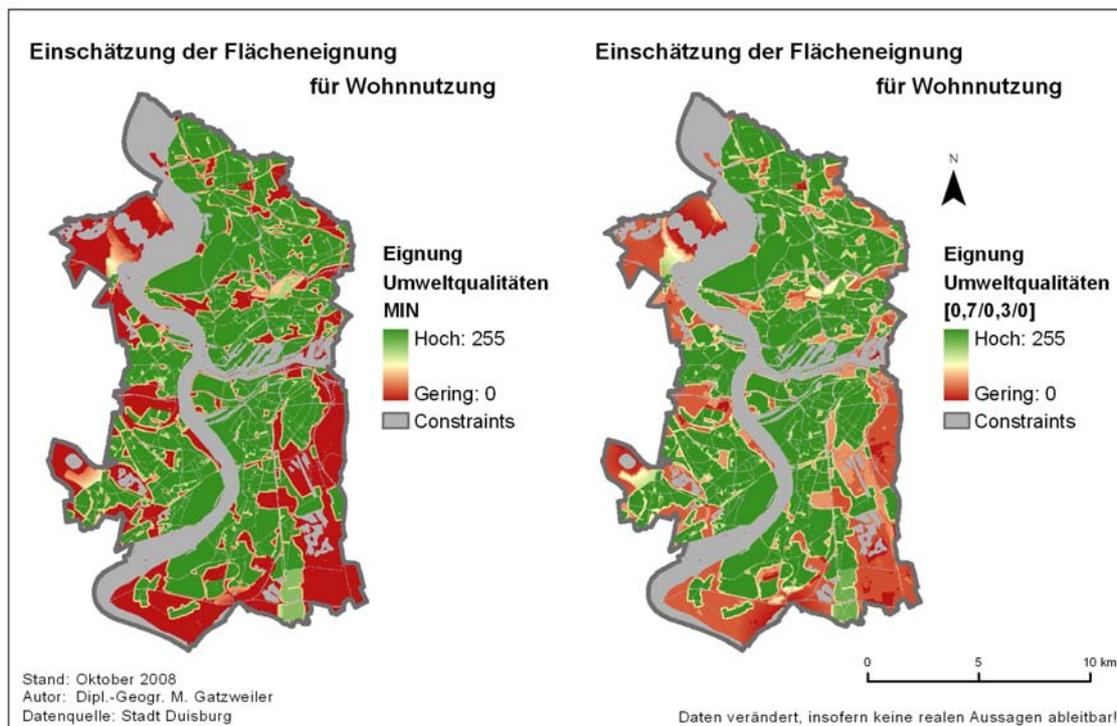


Abb. 4-23: Eignungskarten Umweltqualitäten: MIN / OWA  $[0,7/0,3/0]$

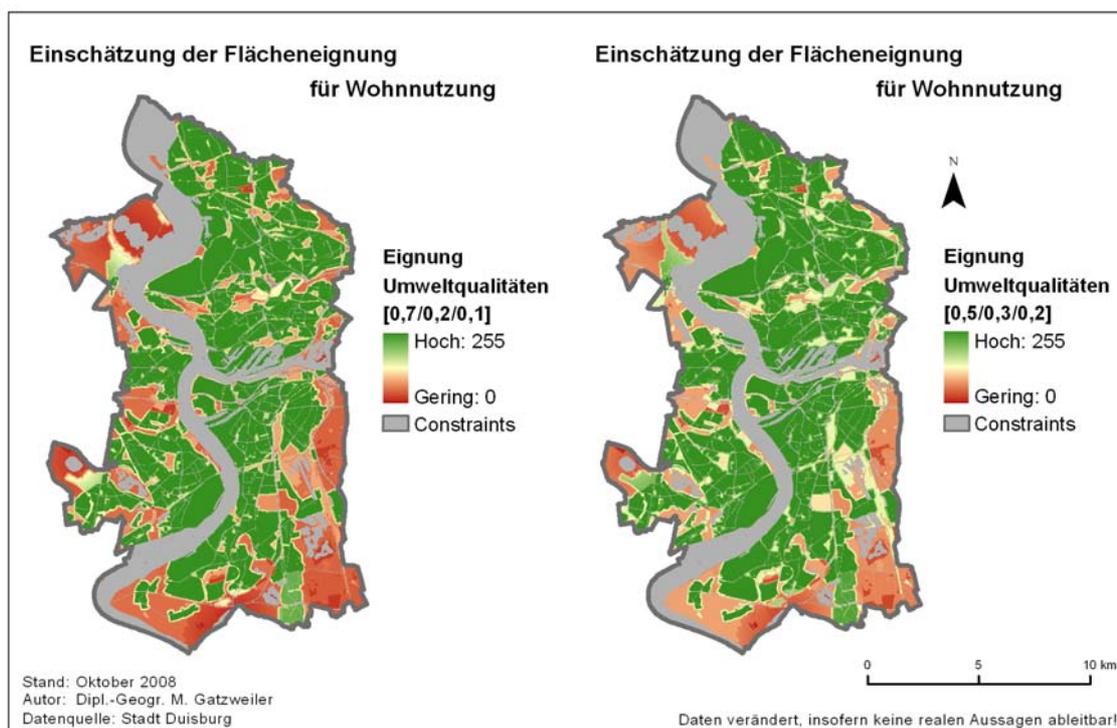
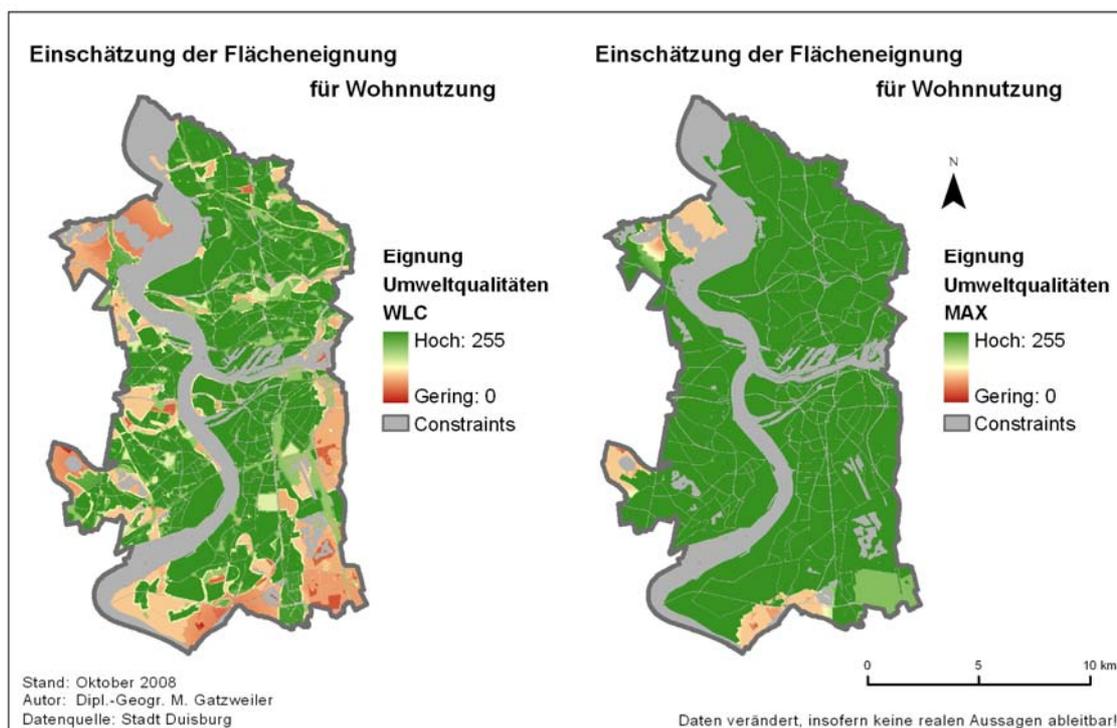


Abb. 4-24: Eignungskarten Umweltqualitäten: OWA  $[0,7/0,2/0,1]$  / OWA  $[0,5/0,3/0,2]$



**Abb. 4-25: Eignungskarten Umweltqualitäten: WLC / MAX**

Bei der Betrachtung der einzelnen Eignungskarten zeigt sich, dass in allen Karten (selbst der aus der MIN-Methode resultierenden Karte) für weite Teile des Untersuchungsgebiets eine sehr hohe Eignung ausgewiesen wird. Mit zunehmender Risikobereitschaft und steigendem Trade-Off nehmen vor allem die Flächen mit sehr geringer Eignung ab, wobei jedoch selbst unter Anwendung der WLC-Methode große Bereiche noch als tendenziell eher wenig geeignet beurteilt werden. Die im Themenfeld der Vorbelastungen von der MIN-Methode bis zur WLC-Methode zu beobachtende extreme Ausweitung der als geeignet eingestuft Flächen lässt sich in diesem Ausmaß im Hinblick auf die Umweltqualitäten nicht verfolgen. Erst bei der Anwendung der MAX-Methode zeigt sich eine sehr großflächige Einstufung der Alternativen als maximal geeignet, wobei auch hiervon eine kleinere Gesamtfläche betroffen ist als im Bereich der Vorbelastungen. Die Flächen, die von der MIN- bis zur WLC-Methode mit einer besonders hohen Eignung ausgewiesen werden, befinden sich dabei in den Siedlungsgebieten, die größeren der wenig geeigneten Flächen überwiegend in den Randbereichen des Untersuchungsgebiets.

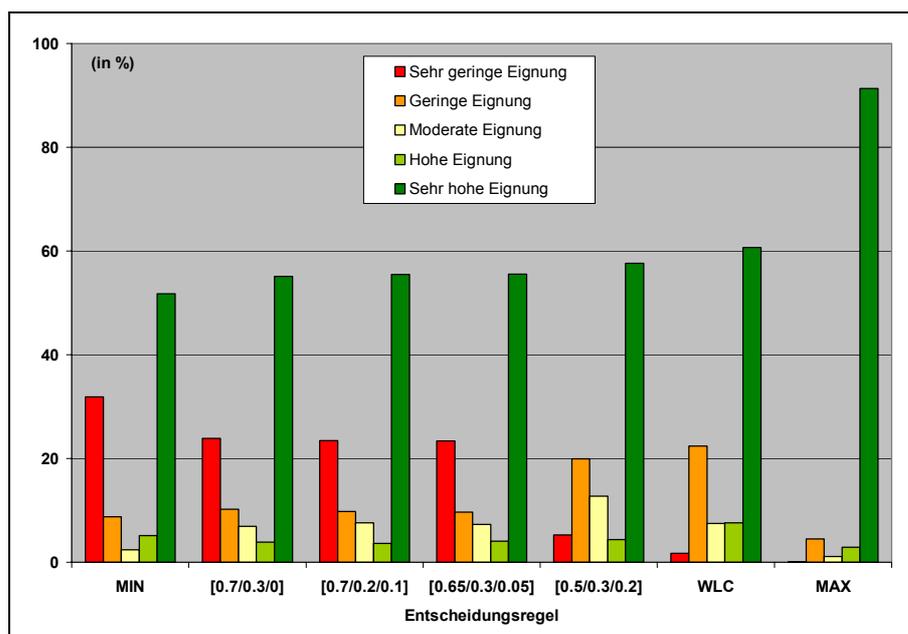
Analog zu dem bereits im letzten Abschnitt verfolgten Vorgehen werden in Tabelle 4-6 die nach den Quintilen klassifizierten flächigen und prozentualen Ergebnisse dargestellt,

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

während Abbildung 4-26 eine Aufbereitung der prozentualen Werte in Diagrammform bietet.

**Tab. 4-6: Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Umweltqualitäten)**

		MIN	OWA [0,7 / 0,3 / 0]	OWA [0,7 / 0,2 / 0,1]	OWA [0,65 / 0,3 / 0,05]	OWA [0,5 / 0,3 / 0,2]	WLC	MAX
Sehr geringe Eignung	km <sup>2</sup>	56,29	42,17	41,46	41,31	9,23	3,07	0,18
	%	31,89	23,89	23,48	23,4	5,25	1,74	0,10
Geringe Eignung	km <sup>2</sup>	15,50	18,01	17,23	17,06	35,23	39,56	7,97
	%	8,78	10,20	9,76	9,66	19,96	22,41	4,51
Moderate Eignung	km <sup>2</sup>	4,28	12,23	13,41	12,89	22,53	13,27	2,01
	%	2,43	6,93	7,59	7,3	12,76	7,52	1,14
Hohe Eignung	km <sup>2</sup>	9,07	6,86	6,45	7,19	7,79	13,48	5,09
	%	5,14	3,88	3,65	4,08	4,41	7,64	2,88
Sehr hohe Eignung	km <sup>2</sup>	91,38	97,26	97,99	98,08	101,72	107,15	161,28
	%	51,76	55,09	55,51	55,56	57,62	60,7	91,36



**Abb. 4-26: Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Umweltqualitäten)**

Auch bei der Betrachtung der Tabelle 4-6 und der Abbildung 4-26 wird sehr schnell offenkundig, dass im Rahmen aller Aggregationen ein sehr großer Anteil an Flächen mit einer sehr hohen Eignung bewertet wird.

Weiterhin lässt sich für die von links aus betrachtet ersten vier Entscheidungsregeln eine große Ähnlichkeit im Hinblick auf die klassifizierten Flächenanteile erkennen. Allenfalls die Ergebnisse der MIN-Methode zeigen nennenswerte Abweichungen im Bereich der moderaten sowie der beiden extremen Klassen. Alle vier Entscheidungsregeln modellieren eine verhältnismäßig hohe Risikoaversion und, mit Ausnahme der MIN-Methode, einen steigenden aber noch relativ geringen Trade-Off. Die Ausweitung des Trade-Off auf alle Kriterien hat im Vergleich zu den im letzten Abschnitt behandelten Vorbelastungen deutlich geringere Auswirkungen. Bei weiter steigendem Trade-Off verringert sich der Anteil der Flächen mit sehr geringer Eignung merklich, während der Anteil der sehr geeigneten Flächen geringfügig, vor allem aber der Anteil der gering geeigneten Flächen deutlich steigt. Diese Tendenz lässt sich sowohl für die fünfte Entscheidungsregel als auch die WLC-Methode verfolgen. Die für den Themenbereich der Vorbelastungen aufgezeigte von der MIN- bis zur MAX-Methode verlaufende sukzessive Entwicklung sinkender Anteile der niedrigeren Klassen zu Gunsten zunehmender Anteile der höheren Klassen lässt sich, wenn auch zum Teil weniger eindeutig, alles in allem auch für den hier betrachteten Bereich der Umweltqualitäten beobachten.

Insgesamt zeigt sich jedoch von der MIN- bis zur WLC-Methode ein, bezogen auf die Variation der Order Weights, robusteres Ergebnis als im Themenfeld der Vorbelastungen (vgl. Abb. 4-22). Die beiden folgenden Abbildungen stellen jeweils für das Themenfeld Vorbelastungen und Umweltqualitäten für jede für Wohnbebauung verfügbare Alternative die Spannweite (Range) zwischen der größten und der kleinsten Werteausprägung dar, einerseits für die in die Aggregation einfließenden einzelnen standardisierten Eignungskarten, andererseits für die aggregierten Gesamteignungskarten, wobei in der letztgenannten lediglich die Entscheidungsregeln von der MIN- bis zur WLC-Methode berücksichtigt wurden. Da die ohnehin aus dem Kreis der relevanten Entscheidungsregeln ausgeschlossene MAX-Methode für den Großteil der Alternativen den Wert 255 liefert, würde ein Einbezug die Ergebnisse der Spannweiten-Analyse in vielen Fällen deutlich verändern bzw. im Hinblick auf die hier relevante Frage verfälschen.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

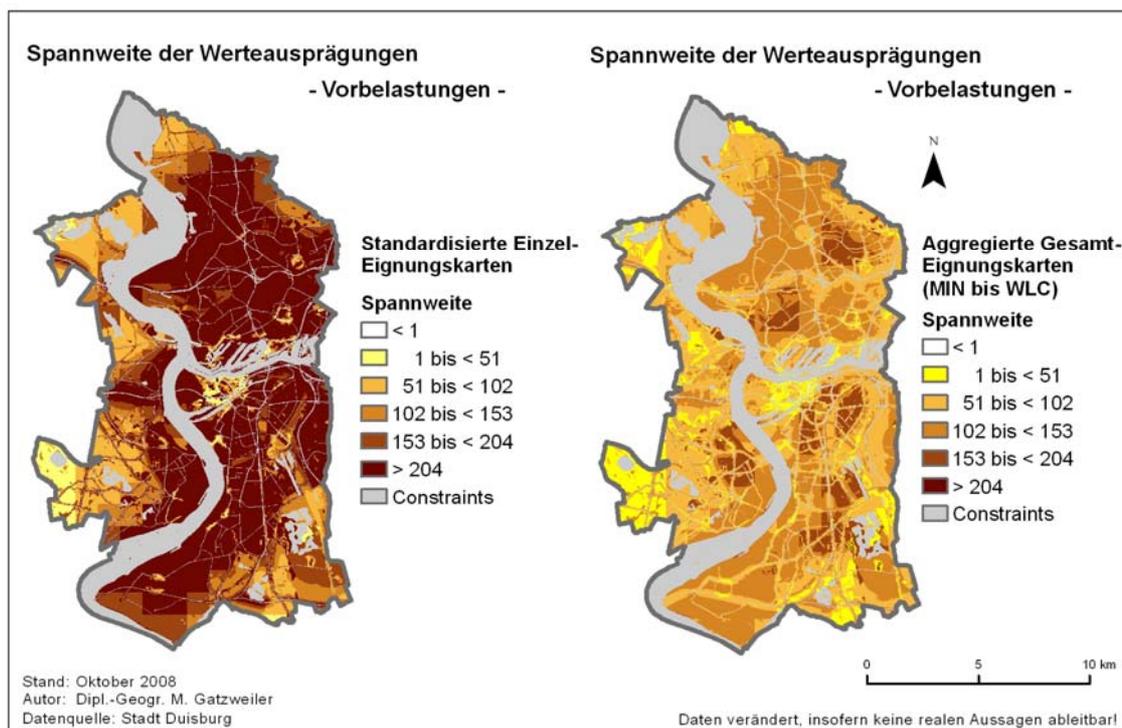


Abb. 4-27: Spannweite der Werteausprägungen im Themenfeld Vorbelastungen

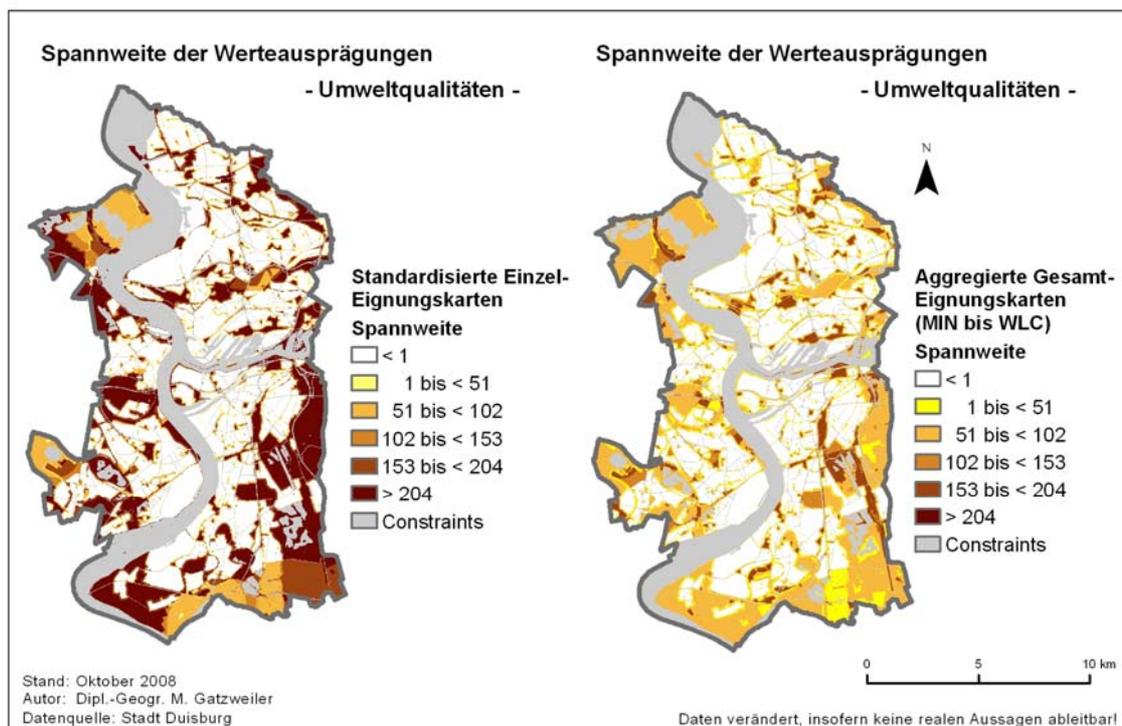


Abb. 4-28: Spannweite der Werteausprägungen im Themenfeld Umweltqualitäten

Bei der Betrachtung der Abbildungen zeigt sich, dass bezogen auf das Themenfeld Umweltqualitäten sowohl im Hinblick auf die als Eingangsdaten für die Aggregation

genutzten einzelnen Eignungskarten, als auch auf die sich aus den unterschiedlichen Order-Weight-Kombinationen ergebenden Gesamteignungskarten für weite Teile des Stadtgebiets eine deutlich geringere Spannweite ermittelt wurde als für das Themenfeld Vorbelastungen. Die standardisierten Eignungskarten der einzelnen betrachteten Umweltaspekte im Bereich der Umweltqualitäten (Freiraumschutz, Naturschutz, Trinkwasserschutz) weisen somit in höherem Maße in die gleiche Richtung als die im Bereich der Vorbelastungen (Verkehrslärm, Gewerbeemissionen, Luftschadstoffe, schädliche Bodenveränderungen).<sup>23</sup> Entsprechend zeigen sich unter Berücksichtigung der genutzten Datenmodellierungen auch bei den verschiedenen Aggregationsszenarien in vielen Fällen deutlich geringere Differenzen zwischen den minimalen und maximalen Ergebniswerten als im Themenbereich der Vorbelastungen.

Eine relevante Ursache für die in vielen Fällen sehr geringe Spannweite im Themenfeld der Umweltqualitäten liegt in der Tatsache, dass die für die drei betrachteten Kriterien Freiraumschutz, Naturschutz und Trinkwasserschutz als bedeutend eingeschätzten Flächen, insbesondere in Bezug auf die beiden erstgenannten und mit hohen Factor Weights versehenen, häufig identisch sind. Gleichzeitig werden große Teile des Untersuchungsgebiets durch Siedlungsbereiche geprägt, die vielfach im Hinblick auf alle drei Belange nicht als schützenswert beurteilt und somit aus Sicht des Schutzes der vorhandenen Umweltqualitäten mit maximaler Eignung für eine Wohnnutzung versehen sind. Mit 49 % der prinzipiell für Wohnbebauung zur Verfügung stehenden Alternativen weist in allen drei standardisierten Eignungskarten der Umweltqualitäten fast die Hälfte des nutzbaren Untersuchungsgebiets einen Wert von 255 auf. Für diese Flächen kommt unter Anwendung des OWA-Ansatzes eine aggregierte Gesamtbeurteilung, unabhängig von dem Ausmaß der in die Modellierung einbezogenen Risikobereitschaft und des Trade-Off, notwendigerweise immer zu dem Ergebnis einer maximalen Eignung, so dass bereits fast die Hälfte der Alternativen einer potenziellen Variation entzogen sind.

Angesichts der relativ geringen Differenzen zwischen den Ergebnissen der einzelnen Aggregationsverfahren im Themenbereich der Umweltqualitäten kommt der Entscheidung für ein den weiteren Berechnungen zugrunde zu legendes Szenario eine vergleichsweise geringere Brisanz als im Zusammenhang der Vorbelastungen zu. Aufgrund der dargestellten Robustheit soll im vorliegenden Fall ein alle Kriterien berück-

---

<sup>23</sup> Auf die kritische Bedeutung der standardisierten Eignungskarten zu den Aspekten Verkehrslärm und Gewerbeemissionen wurde bei der Behandlung der Aggregation im Themenbereich Vorbelastungen bereits eingegangen.

sichtiger Trade-Off bei gleichzeitig verhältnismäßig hoher Risikoaversion genutzt werden. Insofern wird der aus der Order-Weight-Kombination [0,7/0,2/0,1] resultierende Datensatz in die weiteren Arbeitsschritte einfließen.

#### **4.4.3 Gesamteignungskarte (Datenaggregation Ebene 1)**

Nachdem in den letzten Abschnitten Karten erzeugt wurden, die zum einen unter der Zielsetzung „Schutz vor umweltspezifischen Vorbelastungen“, zum anderen unter der des „Schutzes vorhandener Umweltqualitäten“ die für eine potenzielle Wohnnutzung geeigneten Flächen darstellen, gilt es im Weiteren, die entsprechenden Datensätze, die in den jeweiligen Abschnitten als für die nächsten Arbeitsschritte relevant ausgewählt wurden<sup>24</sup>, im Hinblick auf eine beide Themen umfassende umweltspezifische Gesamteignungskarte zusammenzuführen (vgl. Abb. 4-1).

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Hierarchieebenen des Entscheidungsproblems, in denen zwar die Order Weights variiert, die Factor Weights allerdings konstant gehalten wurden, werden auf dieser obersten Hierarchieebene auch die Factor Weights verändert. Wie im Vorfeld bereits ausgeführt (vgl. Kap. 4.3.1) werden die Factor Weights dabei mit Verhältnissen von 75:25, 50:50 und 25:75 in sehr hohem Maße variiert, um unter Berücksichtigung einer derart erheblich veränderten relativen Bedeutung der beiden Themenfelder die Auswirkungen auf die als Ergebnis gelieferten aus Gesamt-Umweltsicht als für Wohnbebauung geeignet eingestuften Flächen zu beobachten. Gleichzeitig werden für jede Factor-Weight-Kombination unter Veränderung der Order Weights mehrere Aggregationsverfahren angewandt.

Im Hinblick auf das einbezogene Risiko werden dabei auch auf dieser Hierarchieebene sowohl die beiden Extrema des „Decision-Rule-Space“ als auch unterschiedliche Entscheidungsregeln zwischen diesen genutzt, wenngleich auch in diesem Fall davon auszugehen ist, dass die durch die extrem risikofreudige MAX-Entscheidungsregel erzeugten Ergebnisse angesichts der zugrunde liegenden Fragestellung nur eingeschränkt verwendbar sind. Mit den ausgewiesenen Werten ist bei dieser Form der Aggregation lediglich die Information verbunden, dass die Flächen in Bezug auf die Zielsetzung eines der beiden betrachteten Kriterien mehr oder weniger gut für die Errichtung von Wohn-

---

<sup>24</sup> Zur besseren Übersicht seien die beiden den weiteren Bearbeitungsschritten zugrunde zu legenden Datensätze kurz in Erinnerung gerufen: Hinsichtlich der Vorbelastungen wird die aus den Order Weights [0,7/0,2/0,1/0] resultierende aggregierte Eignungskarte genutzt, hinsichtlich der Umweltqualitäten die aus den Order Weights [0,7/0,2/0,1] resultierende Eignungskarte.

bebauung geeignet sind. Außer der Gewissheit, dass die Werteausprägung des zweiten Kriteriums geringer als die des ausgewiesenen Kriteriums ist (bzw. im höchsten Fall mit diesem identisch ist), ist der Grad der Zielerreichung des zweiten Kriteriums demgegenüber völlig offen. Während sich somit zwar keine gesicherten Informationen ableiten lassen, an welchen Stellen des Untersuchungsgebiets eine Wohnbebauung unter Berücksichtigung beider Ziele bestmöglich zu errichten wäre, können jedoch anhand niedriger Werteausprägungen die Flächen identifiziert werden, die in keiner der beiden Hinsichten als geeignet anzusehen sind.

Umgekehrt kann die MIN-Entscheidungsregel mit größerer Sicherheit die Flächen liefern, die unter Berücksichtigung beider Kriterien als geeignet anzusehen sind. Da durch dieses Aggregationsverfahren prinzipiell die geringsten Werte ausgewiesen werden, geben hohe Eignungswerte die Standorte an, die hinsichtlich beider Kriterien hohe Zielerreichungsgrade besitzen. Unberücksichtigt bleibt dabei allerdings die Werteausprägung des zweiten Kriteriums und somit u. a. auch dessen Potenzial, die Beurteilung der Gesamteignung zu erhöhen.

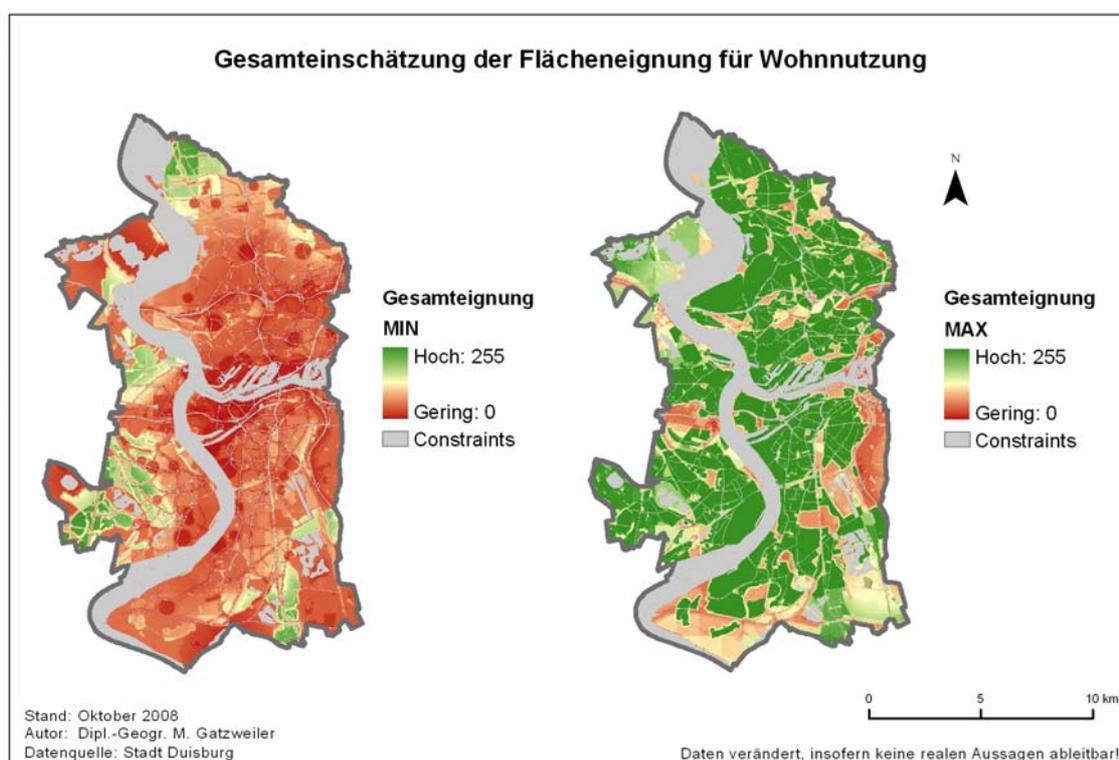
Grundsätzlich haben in einer ausgewogenen Stadtentwicklung sowohl die Anforderungen an gesunde Wohnverhältnisse als auch die Belange des Umweltschutzes Berücksichtigung zu finden. Dennoch besteht im Rahmen einer abwägenden Entscheidungsfindung die Möglichkeit, dem einen Aspekt gegenüber dem anderen (in Teilen) den Vorzug zu geben. Eine besondere Flächeneignung im Hinblick auf eine Zielsetzung könnte in mehr oder weniger begrenzten Dimensionen eine Ursache darstellen eine weniger große Eignung in Bezug auf die zweite Zielsetzung auszugleichen.

Durch die Integration eines Trade-Off wird die Möglichkeit eingeräumt, in einem näher zu definierenden Ausmaß eine derartige Kompensation herzustellen. Neben der einen maximalen Trade-Off aufweisenden WLC-Methode wird zusätzlich eine weitere Entscheidungsregel modelliert, die über ein deutlich geringeres Kompensationspotenzial verfügt. Da gleichzeitig im Hinblick auf die zugrunde liegende Fragestellung und die zuvor angestellten Überlegungen zur einzubeziehenden Risikobereitschaft eine höhere Risikoaversion als sinnvoller angesehen wird als eine geringere, wird diese auf Basis der Order Weights  $[0,7/0,3]$  modelliert. Auf diese Weise wird eine zwischen der MIN- und der WLC-Methode verortete Entscheidungsregel generiert, die zwar einen geringen Trade-Off zulässt, gleichzeitig aber eine deutlich verminderte Gefahr bedeutet, dass eine im Hinblick auf eine der beiden Zielsetzungen kritische Einschätzung der Flächeneignung durch hohe Werte des zweiten Kriteriums in zu starkem Maße kompensiert wird.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

Insgesamt werden somit für die drei definierten Factor-Weight-Kombinationen vier unterschiedliche Entscheidungsregeln mit jeweils speziellen Potenzialen zur Anwendung gebracht.

Da sowohl bei der MIN- als auch bei der MAX-Methode kein Trade-Off einbezogen wird, sind die über die Factor Weights definierten relativen Bedeutungen der beiden betrachteten Kriterien ohne Auswirkung. Entsprechend sind die aggregierten Eignungskarten der MIN- und der MAX-Methode jeweils für alle drei Factor-Weight-Kombinationen identisch. Im Gegensatz hierzu unterscheiden sich die Gesamteignungskarten der beiden weiteren Entscheidungsregeln in Abhängigkeit von den einbezogenen Factor Weights zum Teil deutlich. Die folgenden Abbildungen stellen die aus den dargestellten Modellierungen resultierenden acht unterschiedlichen Szenarien dar.<sup>25</sup>



**Abb. 4-29: Gesamteignungskarten: MIN / MAX**

<sup>25</sup> Verschiedene Versuche die Karten in einer übersichtlichen Matrix aufzubereiten, in der spaltenweise die Entscheidungsregeln (Order Weights) und zeilenweise die Factor Weights aufgetragen werden sollten, um somit in den einzelnen Zellen das jeweils entsprechende Szenario abzubilden, mussten letztlich aus Formatgründen verworfen werden. Bei der Verwendung eines für diese Arbeit realisierbaren Papierformats hätten die einzelnen Karten nur in einer deutlich kleineren Abbildung wiedergegeben werden können. Da dies als schlechtere Variante angesehen wurde, werden die einzelnen Abbildungen hier jeweils paarweise nacheinander abgebildet.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

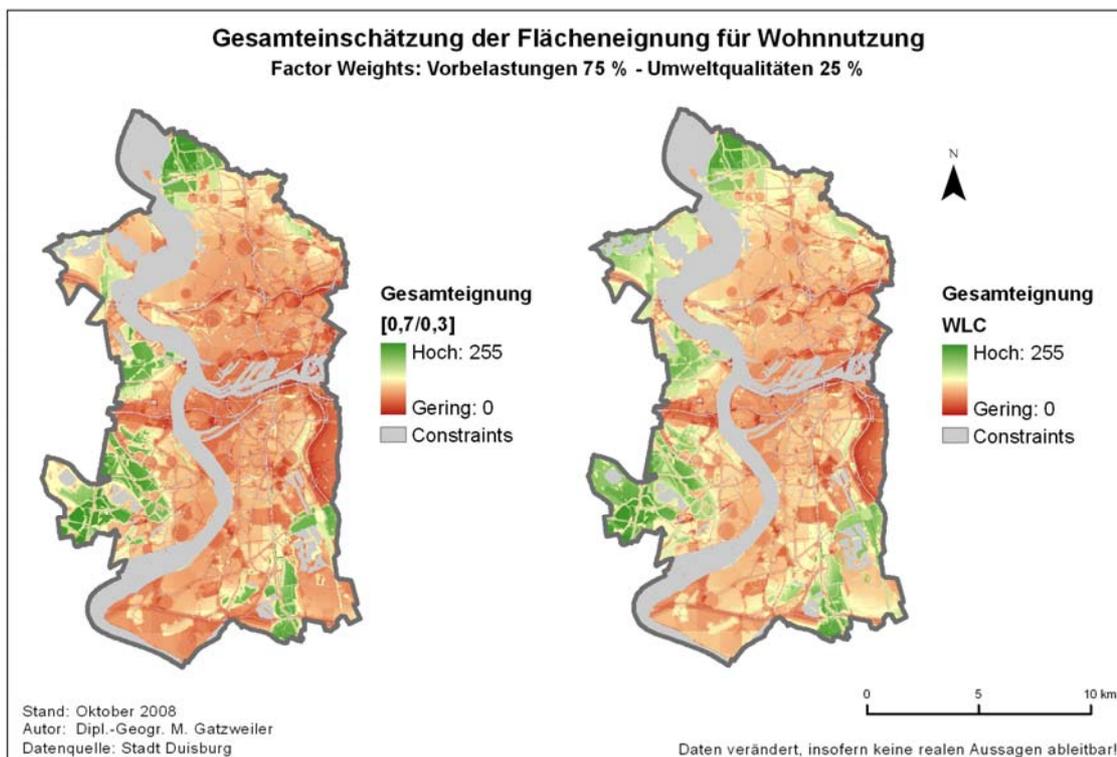


Abb. 4-30: Gesamteignungskarten: OWA [0,7/0,3] / WLC: Factor Weights (75/25)

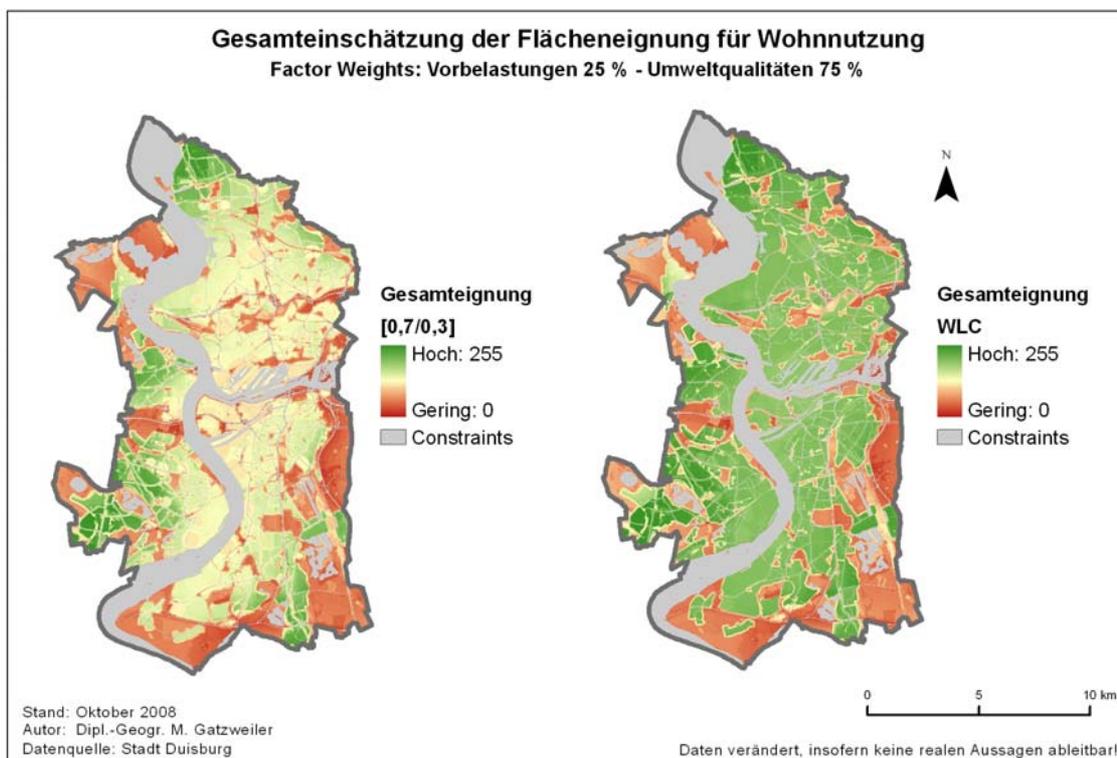
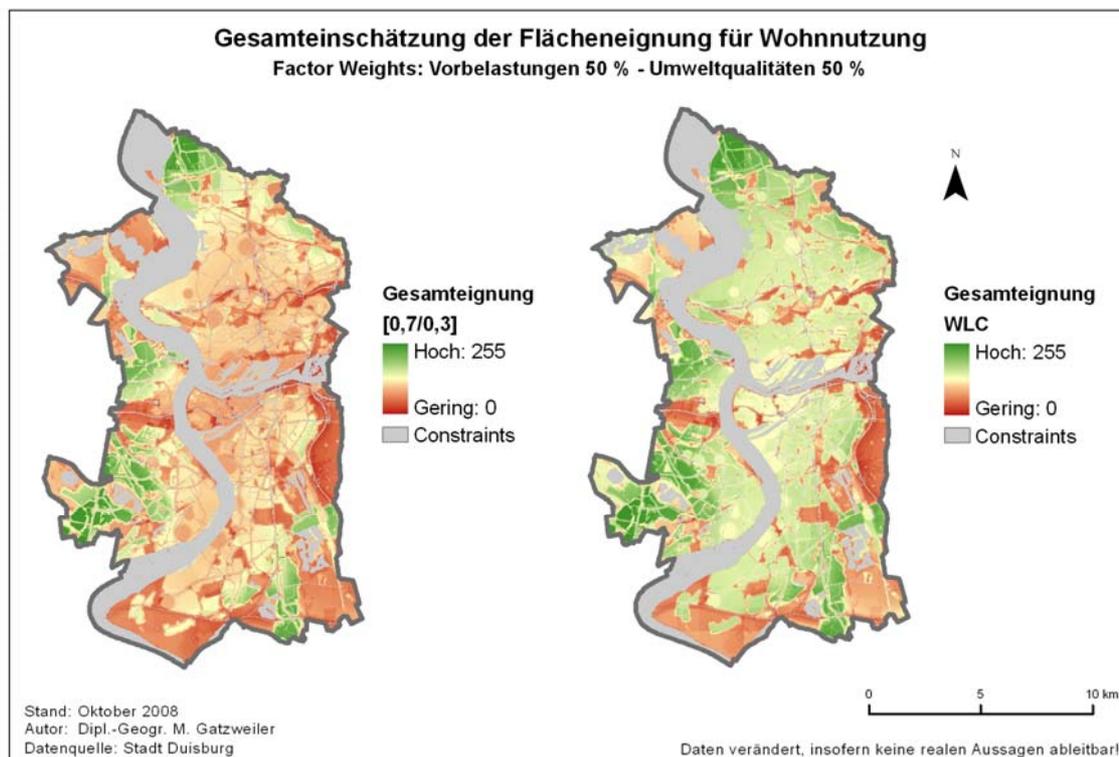


Abb. 4-31: Gesamteignungskarten: OWA [0,7/0,3] / WLC: Factor Weights (25/75)



**Abb. 4-32: Gesamteignungskarten: OWA [0,7/0,3] / WLC: Factor Weights (50/ 50)**

Abbildung 4-29 stellt zunächst die auf Basis der MIN- und der MAX-Methode berechneten Flächeneignungen gegenüber. Da die aus der MIN-Methode resultierende Karte prinzipiell die niedrigsten Werte der betrachteten Kriterien zum Ausdruck bringt, zeigt sich auf diese Weise, dass der Großteil des Untersuchungsgebiets Werte aufweist, die mindestens aus Sicht eines der beiden Kriterien (Vorbelastungen oder Umweltqualitäten) mit einer geringen Eignung ausgewiesen sind. In weiträumigen Bereichen des Siedlungsgebiets sind hierfür in der Regel die Vorbelastungen verantwortlich, in den Außenbereichen oftmals spezielle Umweltqualitäten. Inwieweit für die einzelnen Alternativen geringe Eignungen für beide betrachteten Kriterien vorliegen, lässt sich anhand dieser Karte nicht erkennen (vgl. hierzu Ausführungen zur MAX-Methode). Die grün dargestellten Flächen im Westen, Norden und Südosten lassen demgegenüber jedoch sowohl in Bezug auf den Schutz vor umweltspezifischen Vorbelastungen als auch auf den Schutz der vorhandenen Umweltqualitäten auf eine hohe bis zum Teil sehr hohe Flächeneignung schließen.

Auf der anderen Seite weist die aus der MAX-Methode resultierende Karte die jeweils höchsten Werte der zugrunde liegenden Kriterien aus. Bei einer solchen Modellierung ergeben sich im Umkehrschluss zu den soeben angeführten Aspekten für den Großteil des Untersuchungsgebiets hohe Flächeneignungen. Allerdings sind ebenso verschiedene

Gebiete unterschiedlicher Größe zu beobachten, die sowohl bezogen auf die Umweltqualitäten als auch auf die Vorbelastungen eine geringe Eignung für Wohnnutzung aufweisen. Die rötlich dargestellten Gebiete können unter Berücksichtigung der vorgenommenen Datenmodellierung folglich mit verhältnismäßig großer Sicherheit aus der Suche nach geeigneten Standorten für Wohnbebauung ausgeschlossen werden. Größere hiervon betroffene Flächen sind vor allem in randlichen Lagen im Osten, Südwesten und Westen zu erkennen, teilweise zeigen aber auch die innerhalb des Siedlungsbereichs gelegenen Freiraumflächen geringe bis sehr geringe Eignungswerte.<sup>26</sup>

Abbildung 4-30 zeigt unter Berücksichtigung der Factor Weights (75/25)<sup>27</sup> für beide zur Anwendung gebrachten Entscheidungsregeln tendenziell eine eher geringe Eignung in weiten Räumen des vor allem rechtsrheinischen Siedlungsgebiets und eine demgegenüber höhere Eignung in verschiedenen Teilen des äußeren Bereichs des Untersuchungsgebiets. Insbesondere im Westen, Norden und bestimmten Bereichen des Südostens sind dabei Flächen zu erkennen, die aus Sicht beider zugrunde liegender Zielsetzungen eine hohe Eignung für Wohnnutzung aufweisen.

Im direkten Vergleich der beiden Aggregationsverfahren lässt der mit der WLC-Methode verbundene stärkere Trade-Off bei gleichzeitig geringerer Risikoaversion an vielen Stellen eine höhere Eignung erkennen.

Beispielhaft seien verschiedene Flächen im äußersten Westen sowie Nordwesten angeführt. Während die auf Basis der Order Weights [0,7/0,3] gebildete risikofeindlichere Methode den dort ausgewiesenen niedrigen Kriterienwerten aus Sicht der Umweltqualitäten ein höheres Gewicht zukommen lässt, werden diese unter Anwendung der WLC-Methode durch zum Teil sehr hohe Kriterienwerte aus Sicht der Vorbelastungen deutlich stärker kompensiert. Im Ergebnis liegen die für diese Flächen berechneten Gesamt-

---

<sup>26</sup> Grundsätzlich könnte diskussionsbedürftig sein, inwieweit Flächen mit hohen bzw. sehr hohen Vorbelastungen gleichzeitig hohe bzw. sehr hohe Umweltqualitäten bedeuten können / sollen. Denkbar wäre, dass in einem solchen Fall die Umweltqualitäten in einem gewissen Maße als verringert angesehen werden bzw. umgekehrt die gering vorbelasteten und gleichzeitig durch hohe Umweltqualitäten geprägten Flächen zusätzlich aufgewertet werden. Von hoher Bedeutung bei dem nicht nur an dieser Stelle relevanten komplexen Thema der Wechselwirkungen wird aber neben der konkreten Art der Vorbelastung u. a. auch das jeweils im Hinblick auf die Umweltqualitäten betrachtete Schutzgut sein. In dieser Arbeit soll dieses Thema nicht weiter behandelt werden, bei einer weiteren Ausarbeitung wären in diese Richtung allerdings an verschiedenen Stellen entsprechende Anpassungen der Modellierung erforderlich.

<sup>27</sup> Im Gegensatz zum Gebrauch der eckigen Klammern bei der Behandlung der Order Weights, werden die runden Klammern im Weiteren zur Bezeichnung der Factor Weights genutzt. Der erste Wert bezieht sich dabei auf die in Prozentwerten angegebene relative Bedeutung des Ziels „Schutz vor umweltspezifischen Vorbelastungen“, der zweite Wert auf die des Ziels „Schutz der vorhandenen Umweltqualitäten“.

eignungen in der linken Karte im unteren bis mittleren Wertebereich (rötlich bis gelb), in der rechten Karte hingegen im mittleren bis hohen Bereich (gelb bis grün).

Umgekehrt werden auch geringe Flächeneignungen aus Sicht der Vorbelastungen durch hohe Kriterienwerte der Umweltqualitäten durch die WLC-Methode stärker ausgeglichen als durch das andere betrachtete Aggregationsverfahren. Aufgrund der hohen relativen Bedeutung der Vorbelastung gegenüber den Umweltqualitäten wirken sich diese Differenzen zwischen den beiden Kriterien jedoch weniger stark auf die Gesamtbeurteilung und somit die farbliche Darstellung aus. Trotz zum Teil vergleichbarer Wertedifferenzen zu den zuvor angeführten Beispielflächen lassen sich für verschiedene Alternativen im rechtsrheinischen Siedlungsbereich zwischen den beiden Karten kaum nennenswerte Unterschiede in den Ausweisungen erkennen, die rote Färbung wird an diesen Stellen nur geringfügig blasser.

Im unmittelbaren Vergleich zu den zuletzt dargelegten Ausführungen zeigt Abbildung 4-31 für beide genutzten Entscheidungsregeln vor allem eine vielfach deutlich höhere Flächeneignung innerhalb des Siedlungsgebiets. Umgekehrt wird offensichtlich, dass u. a. die Flächen des randlich gelegenen Außenbereichs eine meist sehr geringe Eignung aufweisen. Als Ursache hierfür ist insbesondere die mit der Vergabe der Factor Weights (25/75) verbundene erhebliche Verlagerung der Gewichtung von den Vorbelastungen auf die Umweltqualitäten anzusehen.

Durch die hohe Gewichtung der Umweltqualitäten und die modellierte Möglichkeit zum Trade-Off werden hohe Vorbelastungen (und somit in dieser Hinsicht geringe Eignungswerte) in erheblichem Maße durch geringe Umweltqualitäten und den daraus resultierenden hohen Eignungswerten ausgeglichen. Umgekehrt können niedrige Vorbelastungen hohe Umweltqualitäten jedoch nur in geringerem Maße kompensieren.

Beim Vergleich der Resultate der beiden genutzten Entscheidungsregeln zeigt sich erneut, dass durch das risikoaversere Aggregationsverfahren [0,7/0,3] die alternativenspezifisch niedrigeren Eignungswerte stärker berücksichtigt werden als die jeweils höheren Eignungswerte. Entsprechend wird beispielsweise für große Teile des Siedlungsbereichs aufgrund der hohen Vorbelastungen eine geringere Gesamteignung berechnet als durch die WLC-Methode, die bei größerer Risikobereitschaft ein allein durch die Factor Weights beeinflusstes maximales Kompensationspotenzial bietet.

Abbildung 4-32 stellt für beide Entscheidungsregeln im Hinblick auf die relative Bedeutung der beiden betrachteten Kriterien eine vielfach mittlere Lösung zwischen den jeweiligen zuvor angeführten Szenarien dar.

Da mit den Factor Weights (50/50) eine kriterienspezifische Gleichgewichtung verbunden ist, werden die ausgewiesenen Gesamtbeurteilungen lediglich durch die Kriterienwerte und die Order Weights bestimmt. Entsprechend können unter Anwendung der WLC-Methode beide Kriterien einander in gleichem Maße kompensieren. Die Gesamtbeurteilung auf Basis hoher Eignungswerte in Bezug auf Vorbelastungen und niedriger Eignungswerte in Bezug auf Umweltqualitäten führt somit bei gleicher Wertedifferenz, im Gegensatz zu den letzten Szenarien, zu den gleichen Ergebnissen (und somit gleichen Farbgebungen) wie umgekehrt. Insofern lässt sich für die Resultate der WLC-Methode sowohl für die Siedlungs- als auch die Außenbereiche eine häufig im mittleren Bereich liegende Beurteilung zwischen den entsprechenden Karten der Abbildung 4-30 und Abbildung 4-31 beobachten. Insgesamt ergibt sich auf diese Weise vor allem für große Teile des Siedlungsgebiets aufgrund der sehr hohen Kriterienwerte der Umweltqualitäten eine mittlere bis hohe Gesamteignung.

Demgegenüber werden unter Verwendung der Order Weights [0,7/0,3] an den meisten Stellen deutlich geringere Gesamtbeurteilungswerte ausgewiesen. Durch die höhere Gewichtung der alternativenspezifisch jeweils niedrigeren Eignungswerte wird insgesamt ein risikoärmeres Szenario als durch die WLC-Methode berechnet, das allerdings im Vergleich zu den entsprechenden Karten der Abbildung 4-30 und Abbildung 4-31 ebenfalls in einem überwiegend mittleren Bereich liegt. Große Teile des Siedlungsgebiets lassen eine in einem mittleren bis geringen Wertebereich liegende Beurteilung erkennen. Weite Teile des Außenbereichs sind durch zum Teil sehr niedrige Werte geprägt. Als geeignet anzusehende Flächen werden durch diese Modellierung vor allem im Westen, Norden und Südosten ausgewiesen.

Alles in allem geben die angeführten Szenarien für große Teile des Untersuchungsgebiets in Abhängigkeit von der Definition der Factor Weights und Order Weights mitunter erheblich unterschiedliche Beurteilungswerte im Hinblick auf die Flächeneignung für Wohnnutzung wieder. Die folgende Tabelle listet, analog zum Vorgehen der zweiten Hierarchiestufe, für alle dargestellten Szenarien die in Quintile klassifizierten absoluten und relativen Flächengrößen auf. Die angeführten zum Teil deutlich differierenden Be-

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

urteilungsergebnisse werden dabei bezogen auf die Gesamtheit des Untersuchungsgebiets offenkundig.

**Tab. 4-7: Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Gesamtumwelt)**

			(75/25)	(75/25)	(50/50)	(50/50)	(25/75)	(25/75)	
		MIN	[0,7 / 0,3]	WLC	[0,7 / 0,3]	WLC	[0,7 / 0,3]	WLC	MAX
<b>Sehr geringe Eignung</b>	km <sup>2</sup>	103,7	23,1	13,7	18,4	10,1	18,5	15,1	6,7
	%	58,75	13,07	7,74	10,4	5,7	10,47	8,56	3,77
<b>Geringe Eignung</b>	km <sup>2</sup>	44,3	98,3	84,5	79,9	43,4	46,5	44,4	22,3
	%	25,09	55,71	47,85	45,27	24,61	26,34	25,2	12,65
<b>Moderate Eignung</b>	km <sup>2</sup>	14,9	34,6	49,0	55,7	71,9	76,5	14,4	26,4
	%	8,43	19,62	27,76	31,57	40,74	43,34	8,17	14,97
<b>Hohe Eignung</b>	km <sup>2</sup>	8,5	6,2	20,9	15,4	38,9	23,9	58,8	16,0
	%	4,82	3,51	11,86	8,7	22,08	13,56	33,32	9,09
<b>Sehr hohe Eignung</b>	km <sup>2</sup>	5,1	14,3	8,5	7,2	12,1	11,1	43,7	105,1
	%	2,91	8,09	4,79	4,06	6,87	6,3	24,75	59,53

Die aus den jeweiligen Datenmodellierungen resultierenden prozentualen Flächenanteile der fünf Klassen werden einander zusätzlich in den drei folgenden Abbildungen gegenübergestellt. Aus Übersichtlichkeitsgründen erfolgt eine Differenzierung nach den Factor Weights, wobei in allen Fällen die jeweils für alle Factor Weights identischen Diagramme der MIN- und der MAX-Methode aufgenommen wurden.

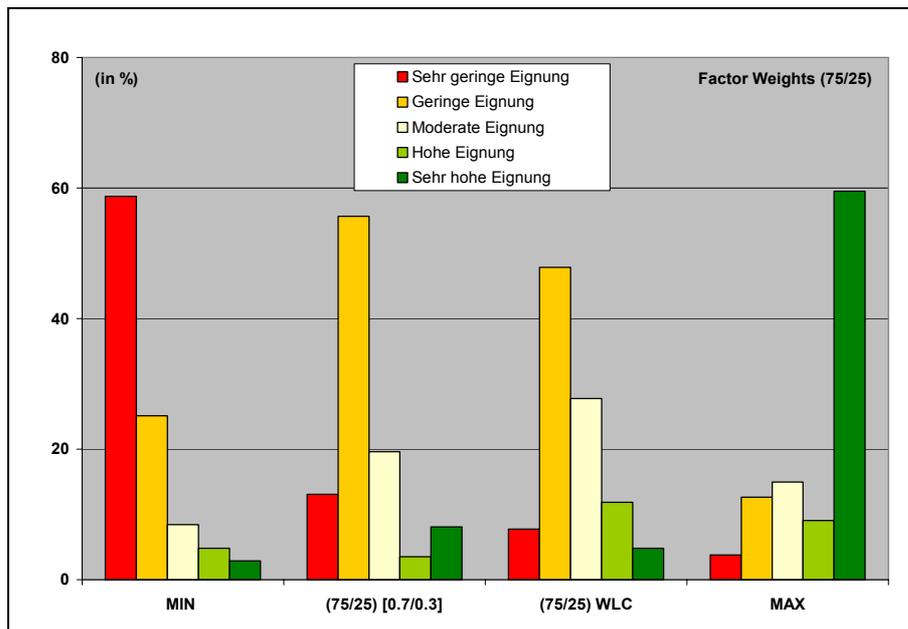


Abb. 4-33: Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung  
(Gesamtumwelt - Factor Weights (75/25))

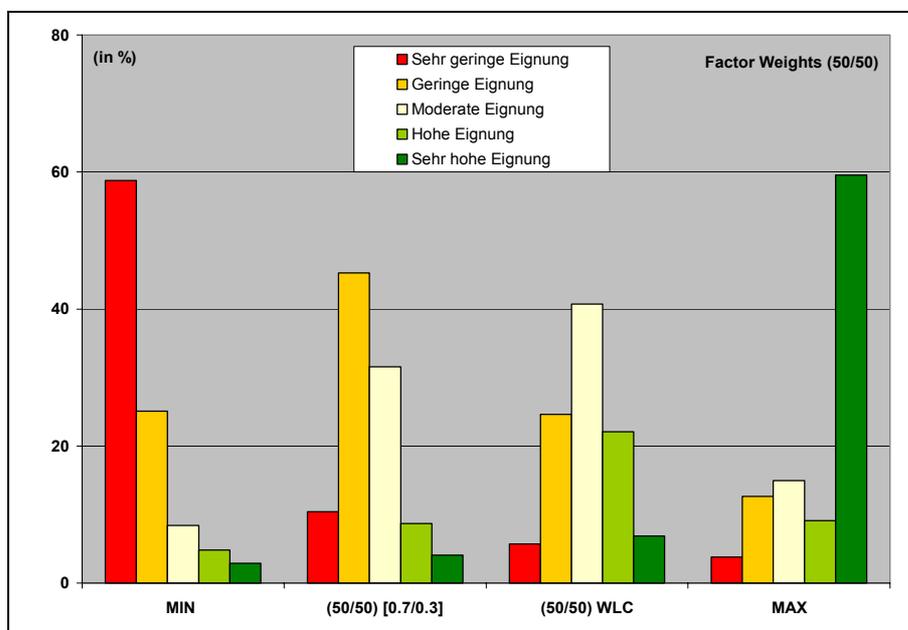
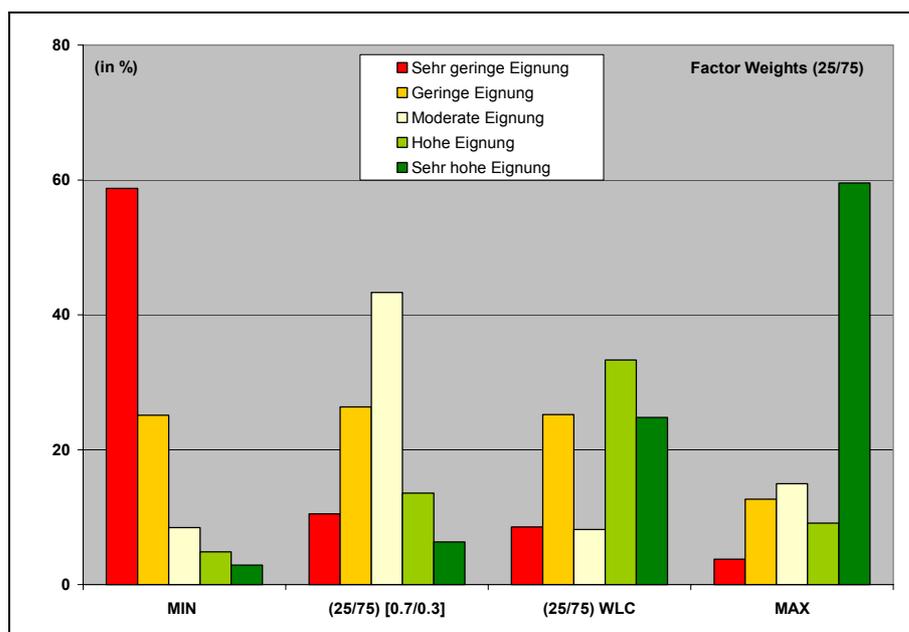


Abb. 4-34: Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung  
(Gesamtumwelt - Factor Weights (50/50))



**Abb. 4-35: Klassifizierte Einstufung der Flächeneignung (Gesamtwelt - Factor Weights (25/75))**

Bei der Betrachtung der drei vorangegangenen Abbildungen bestätigen sich erwartungsgemäß die bereits aus den kartographischen Darstellungen abgeleiteten Beobachtungen.

Abbildung 4-33 zeigt, dass unter Verwendung der Factor Weights (75/25) mit zunehmend risikobereiten Entscheidungsregeln eine Verschiebung der Flächenanteile von niedrigeren Eignungskategorien zu höheren Klassen erfolgt. Während die MIN-Methode für den Großteil der verfügbaren Alternativen eine sehr geringe Eignung berechnet, wird ein nahezu identischer Flächenanteil unter Anwendung der MAX-Methode der höchsten Eignungsklasse zugewiesen. Die beiden anderen die Möglichkeit zum Trade-Off einräumenden Entscheidungsregeln zeigen demgegenüber vor allem in der zweiten und dritten Kategorie größere Flächenanteile. In den Kartendarstellungen sind bei diesen Aggregationsverfahren in weiten Teilen des Untersuchungsgebiets gelbe bis rötliche Flächenfärbungen zu erkennen (vgl. Abb. 4-30). Während die risikoaversere Methode [0,7/0,3] einen hohen Prozentsatz in der als gering geeignet eingestuften Klasse ausweist, ist dieser bei der einen maximalen Trade-Off einbeziehenden WLC-Methode geringer ausgeprägt. Stattdessen ist ein größerer Anteil vor allem in der mittleren Kategorie zu beobachten.

Auch die in Abbildung 4-34 dargestellten aus einer Gleichgewichtung der Factor Weights resultierenden klassifizierten Flächenanteile lassen eine sukzessive Verschiebung der Anteile von den niedrigeren Eignungsklassen zu den höheren erkennen. Die

beiden extremen Kategorien zeigen dabei sehr anschaulich eine kontinuierlich gegenläufige Bewegung.

Erneut werden durch die noch relativ stark risikoaverse Entscheidungsregel hohe Flächenanteile im unteren und mittleren Bereich berechnet, wenngleich bereits eine deutlich weniger konservative Beurteilung erfolgt als durch die MIN-Methode. Durch den hohen Trade-Off der WLC-Methode nehmen die niedrigen Eignungen weiter ab, während die mittleren bis hohen Beurteilungen steigen. In der Kartendarstellung wird hierbei für einen Großteil des Untersuchungsgebiets eine gelbe bis grünliche Flächenfärbung, gegenüber der aus der risikoaverseren Regel resultierenden deutlich rötlicheren Färbung, dargestellt (vgl. Abb. 4-32). Mit der maximal optimistischen Entscheidungsregel weiten sich die Anteile der obersten Kategorie bei gleichzeitig sinkenden Anteilen der übrigen Klassen erheblich aus.

Abbildung 4-35 lässt die für die beiden bisher angeführten Factor-Weight-Kombinationen dargestellten Beobachtungen auch für die Factor Weights (25/75) erkennen. Auch in diesem Fall ist mit zunehmender Risikobereitschaft der Entscheidungsregel eine deutliche Verschiebung der Flächenanteile zu den hohen Kategorien zu beobachten. Die durch die WLC-Methode im Vergleich zur Order-Weight-Kombination [0,7/0,3] berechneten deutlich größeren Flächenanteile für die hohe bzw. sehr hohe Eignungsklasse lässt sich auch in der entsprechenden Kartendarstellung verfolgen (vgl. Abb. 4-31). Hier sind große Teile des Untersuchungsgebiets in deutlichem Grün dargestellt, während die risikoaversere Methode tendenziell eher Flächenfärbungen des mittleren Wertebereichs aufweist.

Neben der Gegenüberstellung der in Eignungskategorien klassifizierten prozentualen Flächenanteile bei erfolgter Variation der Entscheidungsregel (Order Weights) ist auch deren Vergleich bei Veränderung der Factor Weights interessant.

Hierzu kann bei entsprechender Anordnung der vertikale Abgleich der drei vorangegangenen Abbildungen dienen. Da die Ergebnisse der MIN- und MAX-Methode von den Ausprägungen der Factor Weights unabhängig sind, konzentriert sich dieser Vergleich auf die beiden mittleren Entscheidungsregeln.

Bei der Betrachtung der Order Weights [0,7/0,3] zeigt sich, dass mit abnehmender Gewichtung der Vorbelastungen bei gleichzeitig steigender Gewichtung der Umweltqualitäten die Anteile der niedrigen Eignungskategorien sinken, während vor allem die der mittleren, zum Teil aber auch die der höheren steigen.

Im Hinblick auf die WLC-Methode lässt sich demgegenüber, nach deutlicher Zunahme der mittleren aber auch der höheren Kategorien bei gleichgewichteten Factor Weights, bei vorrangiger Gewichtung der Umweltqualitäten vor allem eine weitere Ausweitung der Anteile der höheren Eignungskategorien erkennen.

Auch diese Entwicklungen konnten bereits bei der Betrachtung der Kartendarstellungen verfolgt werden. Das zunehmende Gewicht der Umweltqualitäten auf Kosten der relativen Bedeutung der Vorbelastungen führt dazu, dass vor allem für die großflächigen aus Sicht der Umweltqualitäten zumeist wenig schützenswerten Siedlungsbereiche höhere Gesamteignungswerte ausgewiesen werden, während die im Verhältnis hierzu kleineren Bereiche des Untersuchungsgebiets, die durch hohe Umweltqualitäten gekennzeichnet sind, eher geringere Gesamteignungswerte erhalten.

Insgesamt zeigen sich unter Berücksichtigung der dargestellten Szenarien nicht unerhebliche Unterschiede in der umweltspezifischen Beurteilung der Eignung für die Nutzung Wohnen. Allerdings sind diese Differenzen nicht für alle zur Verfügung stehenden Alternativen in gleichem Maße zu beobachten. Die beiden folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die alternativenspezifische Spannweite der Eignungswerte. Zur Generierung der jeweiligen Karten wurde zum einen unter Fixierung der Order Weights die Spannweite der Eignungswerte auf Basis der variierten Factor Weights berechnet. Für jede Entscheidungsregel wurde dabei der Range über die drei unterschiedlichen Factor-Weight-Kombinationen berechnet, wobei in diesem Zusammenhang, aufgrund der identischen Ausprägung der aus der MIN- und MAX-Methode resultierenden Datensätze, eine Beschränkung auf die Order-Weight-Kombinationen [0,7/0,3] und WLC erfolgte (vgl. Abb. 4-36).

Zum anderen wurde für jede Factor-Weight-Kombination der Range über die aus den unterschiedlichen Entscheidungsregeln resultierenden Datensätze berechnet, wobei analog zum Vorgehen der zweiten Hierarchiestufe die MAX-Methode aus der Betrachtung ausgeblendet wurde. Entsprechend wurden auch an dieser Stelle nur die dargestellten Entscheidungsregeln betrachtet, die zwischen der risikofeindlichsten MIN-Methode und der über maximalen Trade-Off verfügenden WLC-Methode verortet sind. Abbildung 4-37 zeigt die Ergebnisse für die beiden extremen Factor-Weight-Kombinationen (75/25) und (25/75). Auf die Darstellung der Kombination (50/50) wurde demgegenüber verzichtet. In weiten Teilen des Untersuchungsgebiets lässt sich bei dieser Karte jedoch eine große Ähnlichkeit zur rechten Karte der Abbildung 4-36 verfolgen.

#### 4. Ermittlung geeigneter Wohnstandorte aus Umweltsicht

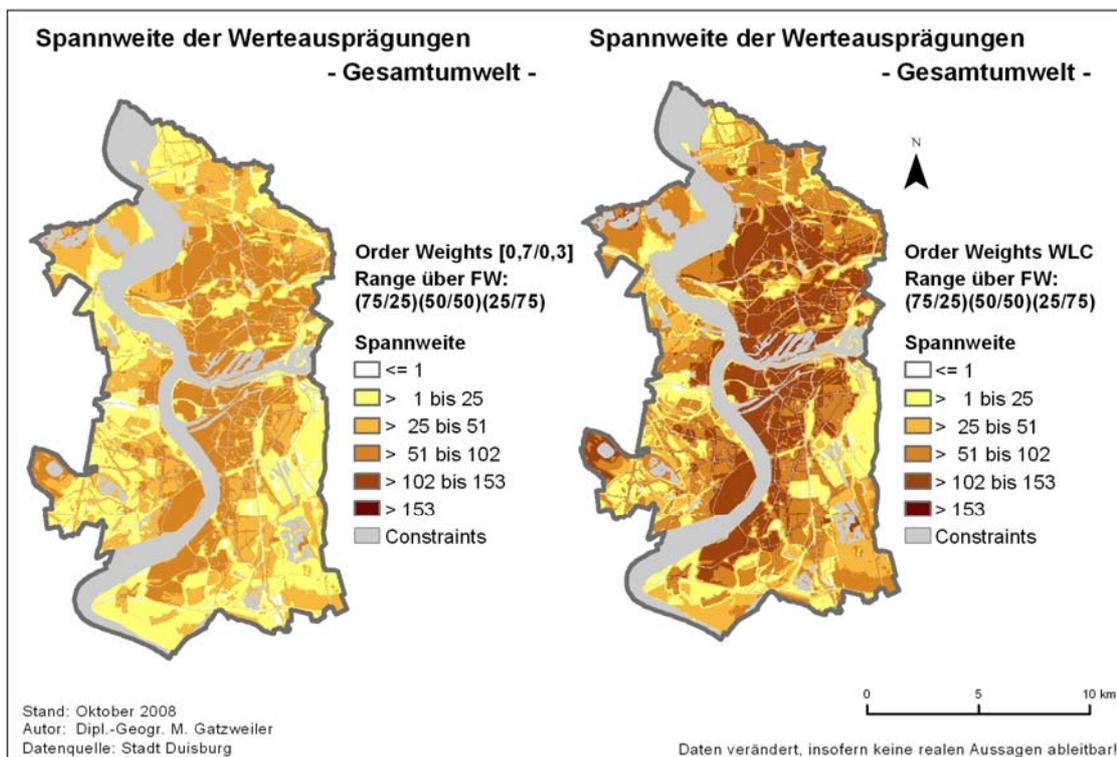


Abb. 4-36: Spannweite der Werteausprägungen (Gesamtumwelt) über Factor-Weight-Kombinationen

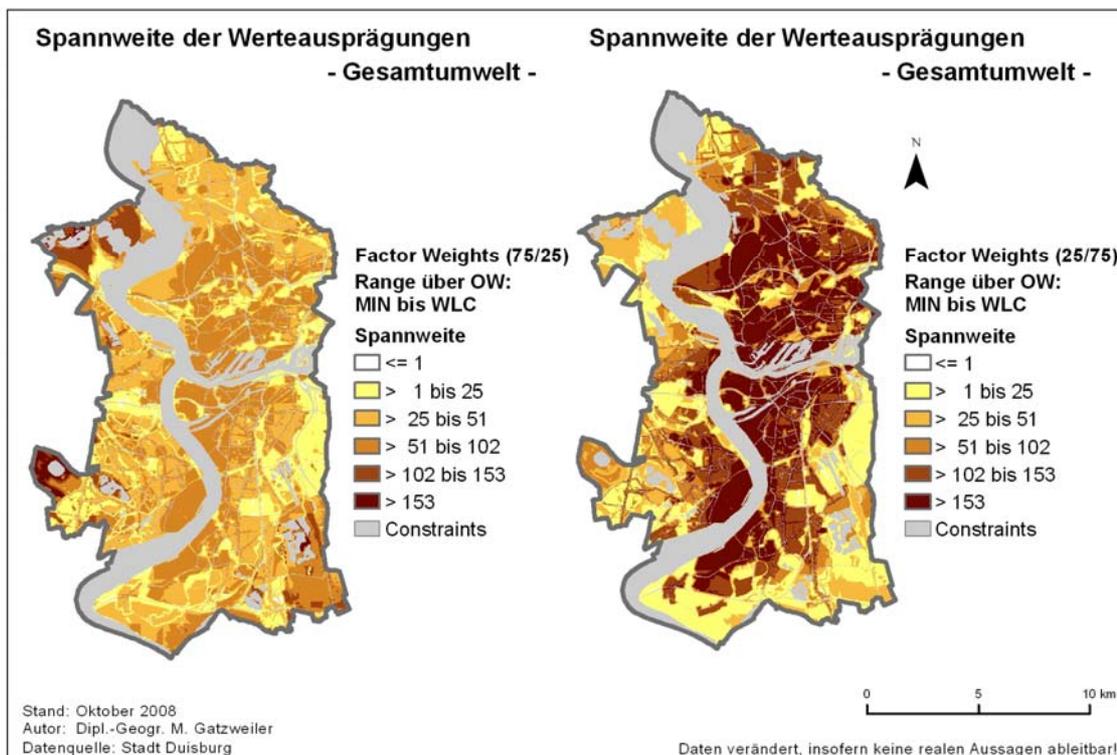


Abb. 4-37: Spannweite der Werteausprägungen (Gesamtumwelt) über Order-Weight-Kombinationen

Abbildung 4-36 zeigt auf der linken Seite für die relativ risikoaverse Entscheidungsregel  $[0,7/0,3]$  die Spannweite der Eignungswerte über die variierte relative Bedeutung der beiden betrachteten Kriterien. Dabei ist zu erkennen, dass ein Großteil des Untersuchungsgebiets durch verhältnismäßig geringe Spannweiten gekennzeichnet ist. Vor allem große Teile des Randbereichs zeigen nur sehr geringe Abweichungen in den Gesamteignungswerten, gelegentlich sogar Flächen, für die die Beurteilung in allen drei Fällen zu dem gleichen Ergebnis kommt. Umgekehrt sind vor allem in weiträumigen Bereichen des überwiegend rechtsrheinischen Siedlungsgebiets die größten Unterschiede in den Beurteilungswerten zu erkennen.

Demgegenüber zeigt die rechte Karte der Abbildung 4-36, bei einer weitgehend ähnlichen Strukturierung des Untersuchungsgebiets, in vielen Fällen größere Differenzen zwischen den aus den einzelnen Factor-Weight-Kombinationen resultierenden Eignungswerten. Allerdings lassen sich auch in dieser Darstellung noch verschiedene Flächen beobachten, für die allenfalls geringe Unterschiede berechnet wurden.

Die höheren Spannweiten der rechten Karte werden unter Berücksichtigung der entsprechenden im Vorfeld abgebildeten Gesamteignungskarten relativ schnell verständlich. Aufgrund des maximal ausgeprägten Trade-Off (d. h. gleichgewichteten Order Weights) kommen durch die Berechnungen der WLC-Methode die erheblichen Variationen der Factor Weights zu ihrer vollen Bedeutung. Da sich in den einbezogenen Datensätzen die Flächen zum Teil deutlich unterscheiden, für die einerseits hohe Eignungswerte aus Sicht der Umweltqualitäten und andererseits aus Sicht der Vorbelastungen vorliegen, kommt es in diesen Fällen in Abhängigkeit von der modellierten relativen Bedeutung zu größeren Differenzen hinsichtlich der Gesamteignungswerte.

Dadurch, dass die risikoaversere Entscheidungsregel auf Basis der Order Weights  $[0,7/0,3]$  grundsätzlich das alternativenspezifische Kriterium mit dem kleineren Eignungswert höher gewichtet, sind die Wertedifferenzen bei variierenden Factor Weights in der Regel geringer ausgeprägt.

Abbildung 4-37 zeigt auf der linken Seite die Spannweite der durch die unterschiedlichen Entscheidungsregeln berechneten Gesamteignungswerte bei Höhergewichtung der Vorbelastungen (75/25). Dabei lassen sich für weite Bereiche des Untersuchungsgebiets tendenziell eher mittlere bis geringe Differenzen zwischen diesen Werten erkennen, während vor allem in den äußersten (nord-)westlichen Gebieten sehr hohe Ranges zu beobachten sind. Für die letztgenannten Bereiche ist somit bei Variation der Entschei-

dungsregel nur eine geringe Robustheit der Gesamteignungswerte zu unterstellen. Hierbei handelt es sich vor allem um die Gebiete, die aus Sicht der Umweltqualitäten über eine sehr geringe Eignung verfügen, während diese aus Sicht der Vorbelastungen sehr hoch ist. Entsprechend berechnet die MIN-Methode sehr geringe Gesamteignungswerte, während aus der in den meisten Fällen für die obere Grenze der Spannweite verantwortlichen WLC-Methode aufgrund der hohen relativen Bedeutung der Vorbelastungen ein deutlich höherer Gesamteignungswert resultiert. Umgekehrt werden hohe Eignungswerte aus Sicht der Umweltqualitäten jedoch bei geringen Eignungswerten aus Sicht der Vorbelastungen (rechtsrheinischer Siedlungsbereich) durch die WLC-Methode deutlich weniger berücksichtigt, so dass bei erneut geringen Werten auf Basis der MIN-Methode der Range deutlich geringer ist. Sofern die Eignungswerte beider Kriterien in die gleiche Richtung weisen, sind die Spannweiten erwartungsgemäß ebenfalls niedrig.

Demgegenüber sind bei Höhergewichtung der Umweltqualitäten insbesondere in großen Teilen des rechtsrheinischen Siedlungsgebiets erhebliche Differenzen zwischen den aus den verschiedenen Entscheidungsregeln resultierenden Gesamteignungswerten zu verfolgen. Im Vergleich zur linken Karte sind allerdings vor allem in verschiedenen Gebieten des randlich gelegenen Außenbereichs geringere Spannweiten zu erkennen. Die Ursachen hierfür entsprechend den letzten Ausführungen mit umgekehrten Gewichtungen.

#### **Fazit:**

Insgesamt zeigt sich, dass die aus den verschiedenen Szenarien resultierenden Ergebnisse für weite Teile des Untersuchungsgebiets zum Teil deutlich unterschiedliche Beurteilungen hinsichtlich der Flächeneignung für Wohnnutzung liefern. Wie sich bei den vorangegangenen Analysen gezeigt hat, liegt eine wesentliche Ursache für die häufig flächenspezifisch geringe Robustheit in den oftmals entgegengesetzten Eignungseinstufungen der beiden als Eingangsdaten genutzten Karten. Während im Hinblick auf den Schutz der Umweltqualitäten vorrangig bestimmte Bereiche der bestehenden Siedlungsgebiete als hoch geeignet anzusehen sind, werden aus Sicht des Schutzes vor umweltspezifischen Vorbelastungen große Teile dieser Gebiete als allenfalls gering geeignet eingestuft. Umgekehrt weisen verschiedene der Gebiete mit den höchsten Umweltqualitäten zum Teil sehr geringe Vorbelastungen aus. Entsprechend werden insbesondere für die im Hinblick auf die beiden Zielsetzungen konflikträchtigen Alternativen die Gesamteignungswerte in hohem Maße von der jeweils definierten relativen Bedeutung der beiden Kriterien beeinflusst, wobei dem von der genutzten Entscheidungsregel ab-

hängigen Umfang, mit dem die Factor Weights auf die Aggregation Einfluss nehmen können, eine erhebliche Bedeutung zukommt.

Auch wenn im Rahmen einer umfangreicheren Sensitivitätsanalyse durchaus weitere Untersuchungen denkbar wären (beispielsweise im Hinblick auf Veränderungen der standardisierten kriterienspezifischen Eingangseignungskarten), können diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt werden.

Allerdings können bereits aus den gewonnenen Erkenntnissen über die für weite Teile des Untersuchungsgebiets vorliegenden wenig robusten Eignungswerte wertvolle Informationen für die Abgabe einer Planungsempfehlung aber auch für erforderliche Überarbeitungen der genutzten Modellierung gezogen werden.

### 5. Planungsempfehlungen

Im letzten Abschnitt mündeten die Informationen der in den vorangegangenen Berechnungen sukzessive erzeugten Ergebnisse in eine alle einbezogenen Kriterien umfassende Eignungskarte. Über die derart generierte Gesamteignungskarte soll eine möglichst verlässliche Antwort auf die eingangs der Arbeit für die operative Ebene aufgeworfene Frage gefunden werden, an welchen Standorten im betrachteten Untersuchungsgebiet aus Umweltsicht die Errichtung weiterer Wohnbebauung am sinnvollsten zu realisieren ist. In Abhängigkeit von verschiedenen Variationen ausgewählter Entscheidungsprozessvariablen (Factor Weights und Order Weights) wurden unterschiedliche Szenarien erzeugt, um die Robustheit der Empfehlungen in dieser Hinsicht zu überprüfen.

Unter Berücksichtigung der auf Basis der dargestellten Datenmodellierung berechneten Ergebnisse können verschiedene Aussagen mit mehr oder weniger großer Sicherheit abgeleitet werden. Die folgende Abbildung stellt zwei ausgewählte Planungsempfehlungen dar. Trotz des prinzipiell kontinuierlichen Wertebereichs wurde die Beurteilung der Flächeneignung aus Übersichtsgründen in diskreten Kategorien dargestellt, wobei die Einteilung der Klassen erneut auf die Quintile des Wertebereichs zurückzuführen ist.<sup>28</sup>

---

<sup>28</sup> Die entsprechenden einen kontinuierlichen Wertebereich darstellenden Karten können den Abbildungen 4-29 und 4-32 entnommen werden.

## Gesamteinschätzung der Flächeneignung für Wohnnutzung

- auf Basis von Vorbelastungen und Umweltqualitäten -

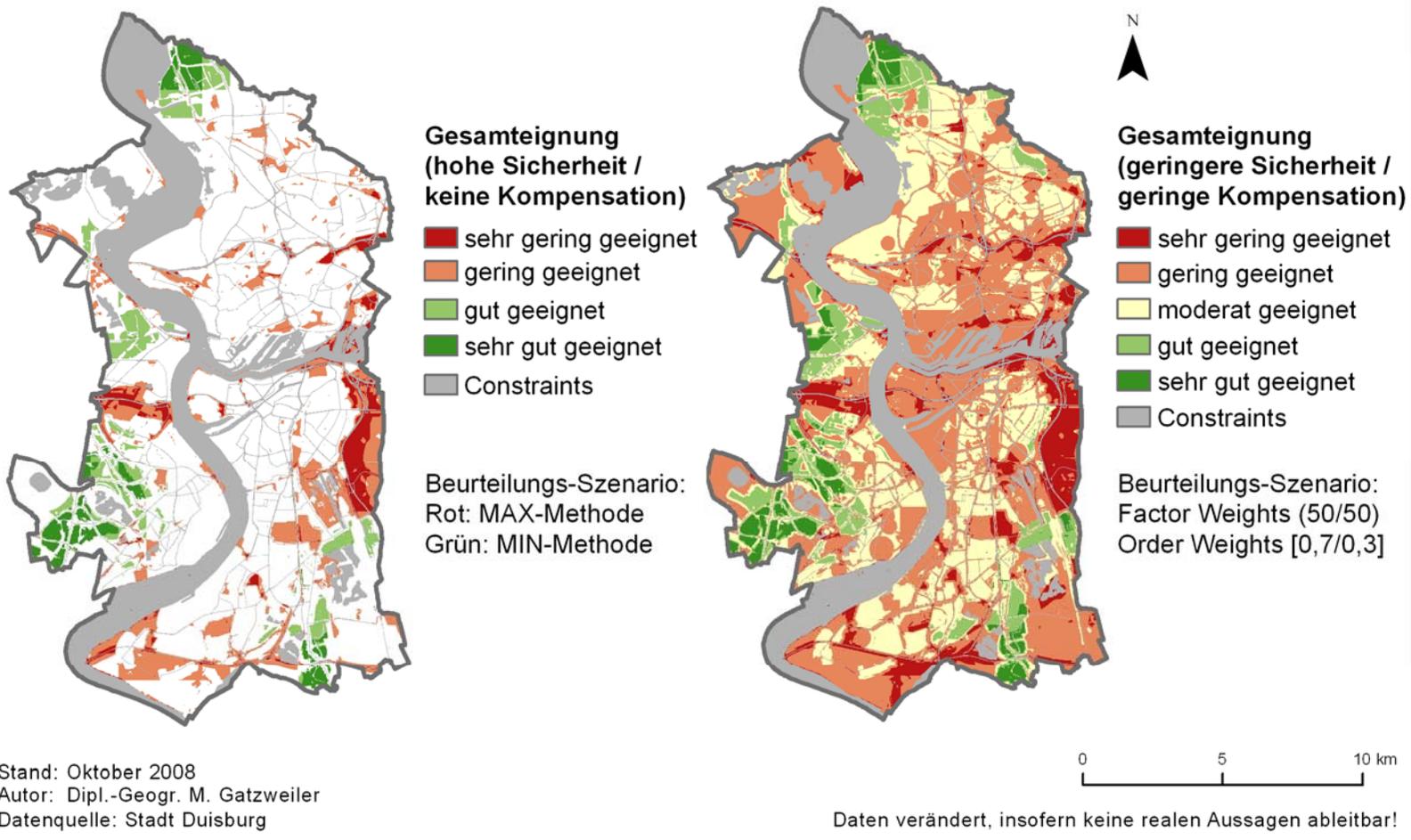


Abb. 4-38: Planungsempfehlungen auf Basis ausgewählter Szenarien

Auf der linken Seite der Abbildung 4-38 werden Flächen dargestellt, die aus Umweltsicht (sehr) gut bzw. (sehr) schlecht für die Realisierung von Wohnbebauung geeignet sind. Die Aussagen sind mit einer sehr großen Sicherheit verbunden, da die Vorrangflächen (grün) den durch die risikoaverse MIN-Methode berechneten Flächen entsprechen. Insofern kann für diese Flächen davon ausgegangen werden, dass die Einstufung der Flächeneignung für beide einbezogenen Kriterien (Vorbelastungen und Umweltqualitäten) mindestens der jeweils ausgewiesenen entspricht. Da die relative Gewichtung beider Kriterien ohne Bedeutung ist, kann die Konfliktrichtigkeit einer solchen Ausweisung in dieser Hinsicht als verhältnismäßig gering angesehen werden.

Vorrangflächen sind dabei in allen drei aus den natürlichen Gegebenheiten der Flussläufe resultierenden Stadtbereichen zu beobachten. Sowohl im Norden als auch im Südosten und im Westen (vor allem im Südwesten) sind dabei zum Teil großflächige Gebiete als aus Umweltsicht für die Realisierung weiterer Wohnbebauung (sehr) geeignet anzusehen.

Die aus Umweltsicht als Tabuflächen einzustufenden Bereiche (rot) basieren umgekehrt auf der MAX-Methode und sind somit ebenfalls mit hoher Sicherheit versehen. Für diese Flächen kann davon ausgegangen werden, dass die jeweiligen Alternativen sowohl aus Sicht der Vorbelastungen als auch aus Sicht der Umweltqualitäten mit einer (sehr) geringen Eignung einzustufen sind. Größere Tabuflächen befinden sich vor allem im Osten, Südwesten und Westen.

In beiden Fällen lässt sich auch unter Berücksichtigung der verschiedenen erzeugten Szenarien eine hohe Robustheit in der Empfehlung für die dargestellten Flächen erkennen (vgl. Kap. 4.4.3). Für die restlichen verfügbaren Alternativen innerhalb des Stadtgebiets (weiß) kann jedoch keine mit einem vergleichbar hohen Grad an Sicherheit verbundene Aussage getroffen werden. Stattdessen variieren die Planungsempfehlungen in zum Teil hohem Maße in Abhängigkeit von den unterstellten Gewichtungen (Factor Weights und Order Weights).

Abbildung 4-38 stellt auf der rechten Seite eines von vielen weiteren möglichen Szenarien einer Planungshinweiskarte dar. Das im Rahmen dieser Arbeit für die abschließende Empfehlung ausgewählte Szenario basiert dabei auf einer Gleichgewichtung der beiden einbezogenen Kriterien (Vorbelastungen und Umweltqualitäten) und auf einer aus den Order Weights [0,7/0,3] resultierenden Entscheidungsregel.

Im Gegensatz zur linken Karte sind die Ergebnisse der rechten Karte unter Einbezug eines Trade-Off zwischen den beiden betrachteten Kriterien (Vorbelastungen und Umweltqualitäten) zustande gekommen, d. h. Ausprägungen des einen Kriteriums können Ausprägungen des zweiten ausgleichen, wodurch die jeweiligen Planungsempfehlungen auf einer abwägenden Betrachtung zwischen beiden Zielsetzungen beruhen. Um vor allem die Gefahr zu verringern, niedrige Eignungen aus Sicht einer Zielsetzung (z.B. „Schutz vor Vorbelastungen“) durch sehr hohe Eignungen aus Sicht der zweiten Zielsetzung (entsprechend „Schutz vorhandener Umweltqualitäten“) durch zu starke Kompensation zu unterschätzen, wurde für die hier abgegebenen Empfehlungen jedoch ein verhältnismäßig risikoaverses Szenario ausgewählt.

Durch die Beschreitung dieses zwischen den „traditionellen“ Aggregationsmethoden (MIN und WLC) liegenden mittleren Wegs wird die Möglichkeit geboten, eine vielfach realitätsnahe abwägende Komponente in die Entscheidungsfindung einzubeziehen, ohne diese zwingend maximal auszugestalten.

Im Vergleich zu der im letzten Abschnitt ebenfalls zur Anwendung gebrachten WLC-Methode können die Ergebnisse im Hinblick auf die Factor Weights als deutlich robuster angesehen werden, die Planungsempfehlungen sind somit in geringerem Maße abhängig von einer Veränderung der relativen Bedeutung der beiden betrachteten Kriterien. Zudem liegt das gewählte hinsichtlich der Factor Weights gleich gewichtete Szenario in Bezug auf die Veränderung der relativen Bedeutung der beiden Kriterien vielfach in einem mittleren Bereich zwischen den beiden anderen Varianten.

Hinsichtlich der Eignungsaussagen lässt sich beobachten, dass unter Berücksichtigung dieser Entscheidungsgrundlage vor allem im Umfeld der bereits auf der linken Seite der Abbildung dargestellten Vorrangflächen weitere Gebiete mit hoher und zum Teil sogar sehr hoher Eignung ausgewiesen werden. Zusätzlich sind im Nordosten des Untersuchungsgebiets zwei weitere Bereiche mit hoher Eignung auf der Planungshinweiskarte erschienen. Insofern zeigt sich im Vergleich zu den aus der MIN-Methode resultierenden Eignungswerten die an verschiedenen Stellen in dieser Arbeit aufgezeigte Tendenz einer Ausweitung der hohen Eignungswerte bei steigender Risikobereitschaft (bzw. Trade-Off).

Bei Anwendung dieses Aggregationsverfahrens sind unter Variation der Factor Weights für alle als (sehr) gut geeignet ausgewiesenen Alternativen nur geringe Spannweiten zu beobachten. Die höchsten Ranges liegen mit Werten von 37 in der dritten Kategorie,

nahezu zwei Drittel der Flächen lassen allerdings Spannweiten von unter 25 erkennen (vgl. Abb. 4-36 links).

Unter Berücksichtigung der alle verfügbaren Alternativen einbeziehenden flächendeckenden Planungsempfehlungen zeigt sich, dass neben den bereits in der linken Karte dargestellten Tabuflächen zusätzlich ein großer Teil des Untersuchungsgebiets ebenfalls als aus Umweltsicht für die Ausweisung von Wohnbebauung ungeeignet angesehen werden muss. Während in den Außenbereichen insbesondere im äußersten (Nord-) Westen und Südosten vor allem die vorhandenen Umweltqualitäten hierfür verantwortlich sind, sind die geringen Eignungswerte im vorwiegend rechtsrheinischen Siedlungsbereich überwiegend auf die hohen Vorbelastungen zurückzuführen.

Insgesamt werden durch die links abgebildete Planungsempfehlung 8,5 km<sup>2</sup> als gut geeignet und 5,1 km<sup>2</sup> als sehr gut geeignet ausgewiesen, durch die rechte Planungsempfehlung 15,4 km<sup>2</sup> als gut und 7,2 km<sup>2</sup> als sehr gut geeignet (vgl. Tab. 4-7).

Für die entsprechend ausgewiesenen Bereiche des Stadtgebiets wäre somit in Fortführung dieser Arbeit bei Bedarf zu prüfen, inwieweit die tatsächliche Möglichkeit zur Errichtung von (weiterer) Wohnbebauung besteht. Auch wenn in die bisherigen Ausführungen nur die großflächigen Bereiche einbezogen wurden, lassen sich vereinzelt kleinere Flächen erkennen, die im Hinblick auf eine sinnvolle Nutzbarkeit beleuchtet werden müssten. Die Definition eines unteren Schwellenwerts für eine Flächeneignung wird in dieser Richtung ein erster Schritt sein (vgl. Kap. 4.2).

Da sich große Teile der als aus Umweltsicht (sehr) geeignet eingestuften Flächen auf allenfalls gering vorbelastete Gebiete innerhalb des bestehenden Siedlungsbereichs beziehen, besteht eine weitere entscheidende Prüfung darin, das grundsätzliche Potenzial einer Nachverdichtung bzw. eines Flächenrecyclings zu ermitteln. Die vorhandene Bauungsstruktur und -dichte, Art und Maß der tatsächlich vorhandenen baulichen Nutzung, aber auch die mögliche Flächenverfügbarkeit können wertvolle Hinweise in diese Richtung liefern.

Zusätzlich sollten neben den in dieser Arbeit im Vordergrund stehenden Umweltthemen jedoch auch weitere Aspekte einer nachhaltigen Stadtentwicklung in die Betrachtung einbezogen werden. Die Nähe zu bestehenden (Stadtteil-)Zentren, zu unterschiedlichen Einrichtungen des sozialen und gesundheitlichen Bedarfs, zu Freizeit- und Erholungsmöglichkeiten sowie die Anbindung an den öffentlichen Personen(nah)verkehr stellen einige bedeutende in diese Richtung weisende relevante Themenfelder dar.

Sofern die tatsächlich nutzbaren Flächen der als (sehr) geeignet berechneten Gebiete nicht ausreichen um den Bedarf an Wohnbebauung zu decken, müsste die Prüfung bei einer Orientierung an der auf der rechten Seite der Abbildung 4-38 gegebenen Planungshinweise sukzessive auf die hinsichtlich der Eignungsbeurteilung folgenden Flächen ausgeweitet werden. Allerdings sollte hierzu nach Möglichkeit nicht auf die diskrete Kategorisierung, sondern den zugrunde liegenden kontinuierlichen Wertebereich zurückgegriffen werden. Zusätzlich sollte im Hinblick auf ein möglichst geringes Konfliktpotenzial auch die Spannweite der Eignungswerte der anderen Szenarien in die Betrachtung einfließen.

Auch wenn im Rahmen dieser Arbeit das angeführte verhältnismäßig risikoaverse und im Hinblick auf die relative Bedeutung der beiden betrachteten Zielsetzungen vielfach in einem mittleren Bereich gelegene Szenario ausgewählt wurde, muss darauf hingewiesen werden, dass durchaus auch Gründe für die Auswahl anderer Szenarien hätten gefunden werden können. Da die Wahl der zu nutzenden Gewichtungen nicht als werturteilsfreie objektive Handlung angesehen werden kann, ist angesichts der im konkreten Fall vorliegenden häufig geringen Robustheit der Eignungswerte, die Abgabe einer gesicherten Planungsempfehlung mit nicht unerheblichen Schwierigkeiten verbunden. Im nächsten Kapitel wird dieser Aspekt eingehender betrachtet.

## 6. Evaluation

### 6.1 Zusammenfassung

Einer sachgerechten Stadtplanung kommt die häufig komplexe Aufgabe zu, unter Berücksichtigung eines vielschichtigen Geflechts unterschiedlichster Belange die Bodennutzung im Stadtgebiet auf Basis abgewogener Entscheidungen zu steuern. Aus dem Gesamtkomplex der hiermit verbundenen Aspekte wurde für die vorliegende Arbeit ein Themenbereich herausgelöst, für den die Möglichkeit geprüft wurde, mittels technischer Methoden entscheidungsunterstützende Informationen zu generieren.

Zur Ermittlung von Bereichen innerhalb der als Untersuchungsgebiet ausgewählten Stadt Duisburg, in denen die Errichtung von Wohnbebauung aus Umweltsicht als besonders geeignet angesehen werden kann, wurde ein Ansatz zur Anwendung gebracht, der Methoden aus der geographischen Informationsverarbeitung und der multikriteriellen Entscheidungsfindung miteinander kombiniert.

Auf Basis von Literaturrecherchen und Gesprächen mit Vertretern des kommunalen Umweltamtes wurden zunächst verschiedene Faktoren ermittelt, die in Bezug auf die Stadt Duisburg aus Umweltsicht als relevante Beurteilungskriterien für eine Standortentscheidung der genannten Art anzusehen sind. Als solche wurden zum einen schädliche Bodenveränderungen, verkehrliche Schallimmissionen, gewerbliche Emissionen sowie verschiedene Luftschadstoffe, zum anderen die Freiraumsituation, naturschutzfachlich bedeutende Bereiche sowie Trinkwasserschutzzonen in die weitere Modellierung einbezogen.

Unter Berücksichtigung der jeweiligen fachlichen Erfordernisse wurden die entsprechenden zuvor in verschiedener Weise zielgerichtet aufbereiteten Eingangsdaten mittels speziell modellierter Fuzzy-Membership-Funktionen in standardisierte Karten umgerechnet, die im Hinblick auf die mit dem jeweiligen Entscheidungskriterium verbundenen Ziele eine Aussage über die flächen- bzw. alternativenspezifische Eignung erlauben. Angesichts der ausgewählten Entscheidungskriterien und deren weitgehenden Aufbereitung auf Basis geltender Normen und fachlicher Vorgaben wurde nicht zuletzt auch versucht, eine möglichst gute Übertragbarkeit auf andere Städte zu gewährleisten.

Die derart erzeugten kriterienspezifischen Eignungskarten wurden im Weiteren unter Berücksichtigung einer definierten hierarchischen Strukturierung des Entscheidungsproblems sukzessive im Hinblick auf jeweils übergeordnete Zielsetzungen zu umfassenderen Beurteilungsgrundlagen zusammengeführt. Hierzu wurden entsprechend des

OWA-Ansatzes zwei Gewichtungen genutzt. Während die Factor Weights die Präferenzen des Entscheidungsträgers hinsichtlich der relativen Bedeutung der betrachteten Entscheidungskriterien zum Ausdruck bringen, bestimmen die Order Weights die Art der Aggregation der Daten. Beide Gewichtungen wurden für jedes Aggregationsverfahren bestimmt, wobei für die höheren Ebenen der Entscheidungshierarchie unter Variation ausgewählter Modellvariablen unterschiedliche Szenarien berechnet wurden. Auf Basis einer für die oberste Ebene durchgeführten Sensitivitätsanalyse konnte gezeigt werden, dass im Rahmen der erfolgten Modellierung die Ergebnisse für weite Teile des Untersuchungsgebiets in nicht unerheblichem Maße von der Bestimmung der Gewichte (Factor und Order Weights) abhängig sind.

Für eine abschließende Planungsempfehlung wurden unter Berücksichtigung der Sensitivitätsanalyse zwei Szenarien ausgewählt von denen das eine auf Basis der erfolgten Modellierung mit relativ hoher Sicherheit 8,5 km<sup>2</sup> als gut geeignet und 5,1 km<sup>2</sup> als sehr gut geeignet ausweist, während das andere mit etwas geringerer Sicherheit 15,4 km<sup>2</sup> als gut und 7,2 km<sup>2</sup> als sehr gut geeignet anführt. Die entsprechenden Flächen lassen sich in allen drei aus den natürlichen Gegebenheiten der Flussläufe resultierenden Bereichen des Stadtgebiets finden, wobei ein Großteil westlich des Rheins verortet ist. Östlich des Rheins sind vor allem im äußersten Norden sowie in bestimmten Bereichen des Südostens großräumigere Bereiche zu erkennen, für die aus Sicht der betrachteten Umweltfaktoren eine hohe Standortgunst für die Errichtung von Wohnbebauung besteht.

### **6.2 Erfordernis zur Weiterführung**

Mit den in Kapitel 5 dargelegten Ausführungen wurden zwar in verschiedenen Bereichen des Untersuchungsgebiets Flächen ausgewiesen, die unter Berücksichtigung der im Rahmen dieser Arbeit erzeugten Modellierung eine aus Umweltsicht hohe Eignung für die Errichtung von Wohnbebauung besitzen, eine zu Beginn der Arbeit geforderte „verlässliche“ Empfehlung ist hiermit allerdings nur in sehr eingeschränktem Maße verbunden. Im Laufe des Bearbeitungsprozesses sind an verschiedenen Stellen sowohl bezogen auf die inhaltliche Datenmodellierung als auch auf die methodische Vorgehensweise mehr oder weniger erhebliche Beschränkungen offensichtlich geworden, die bei der Nutzung der erzeugten Planungshinweiskarten zwingend Berücksichtigung finden müssen. Mit der Betrachtung der erforderlichen Erweiterung der Datenmodellierung

wird dabei gleichzeitig zu einer Behandlung der für die strategische Ebene aufgeworfenen Fragen übergeleitet.

### **6.2.1 Weiterführung in inhaltlicher Hinsicht**

Im Rahmen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse in bestimmten oft sehr großräumigen Bereichen des Untersuchungsgebiets nur eine geringe Robustheit bezogen auf die Variation der Factor Weights und Order Weights aufweisen. Aufgefallen ist dabei u. a., dass der an vielen Stellen zu beobachtenden erheblichen Gegenläufigkeit in den Eignungswerten der beiden betrachteten Kriterien hierfür eine größere Bedeutung zukommt.

Auch wenn eine solche auf die beiden Zielsetzungen (Schutz vor Vorbelastungen und Schutz vorhandener Umweltqualitäten) bezogene Gegenläufigkeit der Eignungsausweisung in der Realität in gewissen Dimensionen zu beobachten sein wird, ist vor allem die mit der hier genutzten Modellierung verbundene in den meisten Fällen sehr pauschale Einstufung des Siedlungsbereichs als aus Sicht der Umweltqualitäten gleichmäßig stark geeignet sehr zweifelhaft. Stattdessen wird in dieser Hinsicht eine größere Differenzierung notwendig sein. Wie bereits im Zuge der Datenmodellierung angesprochen, ist hierfür allerdings eine fundierte Datenbasis u. a. zu den tatsächlichen naturschutzfachlichen Wertigkeiten (der innerörtlichen Flächen) erforderlich, die im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung stand. Flächenspezifische Aussagen zu einem aus Sicht des Biotopverbunds mehr oder weniger stark eingeschränkten Nachverdichtungspotenzial innerhalb des Siedlungsbereichs könnten einen ersten Schritt in diese Richtung bedeuten. Umgekehrt wäre zu prüfen, inwieweit eine Differenzierung der homogenen Schutzwürdigkeit der einzelnen Flächen innerhalb der jeweiligen Schutzgebietskategorien fundiert realisiert werden kann bzw. sollte.

Auch die Aufnahme weiterer Umweltqualitäten könnte zu einer differenzierteren Beurteilung des Siedlungsbereichs beitragen. Nicht zuletzt eine Berücksichtigung des allgemeinen Grundwasserschutzes oder lokalklimatisch relevanter Aspekte wie beispielsweise kaltluftproduzierenden Flächen oder Luftleitbahnen könnte in dieser Hinsicht wertvolle Erkenntnisse einbeziehen.

Auf der anderen Seite ist es für eine realitätsnahe Modellierung zwingend erforderlich alle relevanten Vorbelastungen zu erfassen. Im Hinblick auf die im Rahmen der Arbeit betrachteten Kriterien bedeutet dies vor allem einen stärkeren Einbezug der straßenabschnittsbezogen lokalen luftschadstoffspezifischen Zusatzbelastung sowie eine umfas-

sendere Integration von Daten zur Lärmbelastung. Letzteres bezieht sich zum einen auf die Ausweitung des Straßenverkehrslärms (tags und nachts) auf ein möglichst weiträumiges Straßennetz, zum anderen auf den Einbezug weiterer Lärmemittenten. Insbesondere der Schienenverkehr aber auch verschiedene weitere größere gewerbliche Anlagen werden in bestimmten Teilen des Untersuchungsgebiets, sowohl im Siedlungs- als auch im Außenbereich, zu einer deutlichen Steigerung der Vorbelastungen und somit zumindest in bestimmten Bereichen zu einer wahrscheinlich veränderten Empfehlungen für die Ausweisung von Wohngebieten beitragen. Ein Abgleich der als (sehr) geeignet ausgewiesenen Flächen mit Stadtplan, Luftbildern und speziellen auf Ortskenntnissen basierenden Informationen konnte gerade in dieser Richtung bedeutende Schwächen der gegenwärtigen Modellierung aufzeigen.

Zusätzlich sollte berücksichtigt werden, dass für die Ausweisung in der Regel langfristig bestehender neuer Wohnstandorte nicht nur die gegenwärtigen (bzw. je nach Datenebene mehr oder weniger weit zurückliegenden) Belastungen relevant sind, sondern auch deren zukünftige Entwicklung. Sofern in dieser Hinsicht belastbare Prognosen generiert werden können, sollten diese, zumindest als zusätzliche Szenarien, in die Planung einbezogen werden.

Insgesamt kann bei einer Integration der angeführten Aspekte in die Modellierung die Qualität der Beurteilung der einzelnen Alternativen und somit auch die inhaltliche Verlässlichkeit im Hinblick auf die umweltspezifische Eignung für die Errichtung von Wohnbebauung deutlich erhöht werden.

Neben der hier betrachteten allein auf Umweltaspekten basierenden Flächeneignung sind im Rahmen einer nachhaltigen Stadtentwicklung jedoch ebenso verschiedene zusätzliche Themenfelder relevant, deren Behandlung auf eine vergleichbare Weise erfolgen könnte. Die in dieser Arbeit genutzte umweltspezifische Zielpyramide könnte hierdurch als einer von mehreren Ästen in einen umfassenderen Entscheidungsbaum integriert werden. Entsprechend würden die berechneten Resultate auf einer übergeordneten Ebene unter Berücksichtigung der weiteren Themenfelder sowie näher zu definierender Factor Weights und Order Weights in einer umfassenderen Eignungskarte zusammengefasst. Eine derartige Ausweitung der multikriteriellen Eignungsanalyse würde ebenfalls in Bezug auf die hier betrachtete Ermittlung von Wohnstandorten zu einer sinnvollen inhaltlichen Erweiterung der dargestellten Vorgehensweise führen und zu einer weiteren

Steigerung der Realitätsnähe der Modellierung des Entscheidungsfindungsprozesses beitragen.

Noch weiter würde die Aufweitung der Fragestellung führen, wenn neben der Zielsetzung, möglichst gut geeignete Bereiche für die Realisierung von Wohnbebauung zu ermitteln, gleichzeitig auch die Standortoptimierung anderer ggf. konkurrierender Bodennutzungsformen betrachtet würde, wobei dies unter bestimmten Umständen einen Ansatz aus dem Bereich des Multiobjective Decision Making erforderlich machen würde (vgl. Kap.2).

### **6.2.2 Weiterführung in methodischer Hinsicht**

Neben den inhaltlich bedeutenden Aspekten, die im konkreten Fall zur Beschränkung einer verlässlichen Empfehlung für die Eignung von Standorten für Wohnbebauung führen, müssen bezogen auf den Punkt „Verlässlichkeit“ auch aus methodischer Sicht Abstriche vorgenommen werden. Wie an zahlreichen Stellen in der vorliegenden Arbeit ausdrücklich aufgezeigt wurde, ist der Entscheidungsfindungsprozess durch eine Vielzahl an „Stellschrauben“ gekennzeichnet, die Teil- und Endergebnisse in mitunter hohem Maße beeinflussen können.

Zunächst kommt hierbei, in enger Verbindung zu den letzten Ausführungen, den in den Prozess hineingetragenen Kriterien eine hohe Bedeutung zu. Zu Beginn der Arbeit wurden verschiedene Regeln angeführt, die bei der Auswahl der Entscheidungskriterien zu beachten sind. Auf der einen Seite sollten alle entscheidungsrelevanten Themenfelder Berücksichtigung finden, auf der anderen Seite keine Aspekte (ohne entsprechende Gewichtung) mehrfach betrachtet werden. Insofern sollten weder Themen mit einer ggf. nicht unmittelbar erkennbaren Korrelation einbezogen noch möglicherweise unliebsame Aspekte ausgeblendet werden.

Unmittelbar nach der Bestimmung der entscheidungsrelevanten Kriterien kann zudem der Frage, welche Kriterien als abwägungsrelevante Kriterienkarten und welche als Constraint Map zu modellieren sind, eine hohe Bedeutung zukommen. Auch in diesem Zusammenhang muss, wie im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft für das Themenfeld Naturschutz aufgezeigt wurde, die Differenzierung nicht zwingend eindeutig sein. Die Auswirkungen auf die letztlichen Flächenempfehlungen können jedoch mitunter erhebliche Ausmaße annehmen.

Des Weiteren sind im Bereich der Erstellung der kriterienspezifischen Eignungskarten zahlreiche Möglichkeiten gegeben, die Ergebnisse in die eine oder andere Richtung zu beeinflussen. Die Auswahl des Standardisierungsverfahrens sowie bei Wahl der in dieser Arbeit genutzten Herangehensweise die Bestimmung zu verwendender Beurteilungsgrundlagen bei der konkreten Beeinflussung der kritischen Punkte einer Transformationsfunktion bieten in den meisten Fällen einen erheblichen Spielraum. Da auf diese Weise auch die insbesondere im Hinblick auf die in dieser Arbeit betrachteten Umweltthemen schwer handhabbare Frage der inhaltlichen Vergleichbarkeit der unterschiedlichsten Kriterien im Fokus steht, muss diesem Aspekt eine hohe Aufmerksamkeit gewidmet werden. Eine allgemeingültige „richtige“ Lösung für diese Problematik zu finden, muss vielfach mit hohen Zweifeln versehen werden. Auf zahlreiche dieser Prozessvariablen wurde bei der Modellierung der einzelnen Kriterienkarten hingewiesen, anhand eines Bodenschadstoffs (Arsen) wurden exemplarisch auf unterschiedlichen Parametern beruhende Eignungskarten einander gegenübergestellt.

Die offensichtlichste Möglichkeit zur Beeinflussung der Ergebnisse bieten die beiden unterschiedlichen Arten der Gewichtung. Sowohl den Factor Weights als Definition der Präferenzen des Entscheidungsträgers hinsichtlich der relativen Bedeutung der einbezogenen Themenfelder als auch der Wahl der durch die Order Weights bestimmten Entscheidungsregel, auf deren Basis die einzelnen Informationen zu einer umfassenden Beurteilungsgrundlage zusammengeführt werden, kommt vielfach für die Ergebnisse eine außerordentlich große Bedeutung zu. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte, wie dargestellt, insbesondere für die oberste Ebene der betrachteten Zielpyramide die Analyse der Ergebnisse unter Variation beider Gewichtungen eine für viele Bereiche des Untersuchungsgebiets nur geringe Robustheit der abschließenden Empfehlung aufzeigen.

Aufgrund der Vielzahl an Prozessvariablen, die oftmals stark subjektiv bestimmt die abschließende Beurteilung in hohem Maße beeinflussen, muss eine dem häufigen Anschein nach rationale Objektivität der Ergebnisse angezweifelt werden. Auch wenn durch die Verbindung von Methoden aus dem Bereich der GIS und des MCDM bei der Behandlung der vielgestaltigen komplexen Fragestellung wertvolle Vorarbeit für eine möglichst viele relevante Belange umfassende Entscheidung geleistet werden kann, muss vor einem zu großen Vertrauen in den objektiven Wahrheitsgehalt und die Verlässlichkeit der berechneten Ergebnisse gewarnt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bereits innerhalb der Umweltthemen offensichtlich, dass bei der Verfolgung mehrerer Unterziele in vielen Fällen Konflikte unvermeidlich sind. Allein bezogen auf die Gewichtung der Ziele „Schutz vor Vorbelastungen“ und „Schutz vorhandener Umweltqualitäten“ wurden zum Teil deutlich unterschiedliche Flächeneignungen berechnet. Die Wahl der „richtigen“ Gewichtung wird durch den einzelnen Entscheidungsträger keinesfalls bestimmt werden können. Die Steigerung einer derartigen Konfliktrichtigkeit bei Einbezug weiterer für eine nachhaltige Stadtentwicklung erforderlicher Themenfelder und die hiermit verbundenen Schwierigkeiten bei deren „gerechter“ Lösung können erahnt werden.

Insofern muss unter Aufweitung einer rein technologisch-positivistischen Perspektive die dargestellte Vorgehensweise um Möglichkeiten erweitert werden, den zahlreichen Wertungen vornehmenden Verfahrensschritten eine breitere Legitimität zu verleihen. Die Aufdeckung der „Stellschrauben“, durch welche die Ergebnisse durch subjektive Bewertungen beeinflusst werden, sowie der transparente Umgang mit deren Ausrichtung bei der Generierung von Szenarien bilden grundlegende Schritte in diese Richtung. Ohne eine derartige Transparenz wird eine rationale Nachvollziehbarkeit der berechneten Ergebnisse für „Außenstehende“ vielfach kaum erreicht werden können.

Der intensive Diskussionsprozess über diese „weichen“ Elemente der Entscheidungsfindung und ggf. die kritische Auseinandersetzung mit transparent modellierten Szenarien müssen unmittelbar daran anschließen. Die Bewertung muss dabei immer als gesellschaftliche Aufgabe verstanden werden, wobei Wertvorstellungen in vielerlei (u. a. zeitlicher) Hinsicht Veränderungen unterworfen sind. Der Einbezug aller für die Entscheidungsfindung relevanten Stakeholder ist in diesem Zusammenhang von ausschlaggebender Bedeutung, um eine möglichst breite gesellschaftliche Akzeptanz der mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht immer im Konsens herzustellenden Entscheidungen zu erreichen.

Ansätze des inhaltlich sehr weit gefächerten Group Decision Making können nicht nur dazu dienen, die zumeist komplexen Problemstellungen strukturiert zu organisieren, die Kommunikation und Diskussion zwischen räumlich und zeitlich synchronisierten Teilnehmern zu steuern sowie Möglichkeiten zur Herstellung von Konsens- oder Kompromissergebnissen auszuloten. Durch die Aufweitung der Perspektive auf räumlich und / oder zeitlich asynchrone Entscheidungsbeteiligte eröffnen sie zudem die Möglichkeit auch eine breitere Öffentlichkeit effizienter an dem Prozess teilnehmen zu lassen und auf diese Weise die gesellschaftliche Legitimation der Entscheidungsfindung weiter zu

erhöhen. Nicht zuletzt der Trend von GI-Systemen zu entsprechenden Internetdiensten könnte (zukünftig) sinnvolle Möglichkeiten bieten, auf Basis internetbasierter Partizipations-Tools die Verbindung von MCDM und GIS einem größeren Publikum zur Verfügung zu stellen.

### **6.3 Einschätzung der Nutzbarkeit des Ansatzes für die Stadtplanung**

Insgesamt stellen beide Themenfelder, d. h. sowohl die quantitative und qualitative Ergänzung des für eine realitätsnahe Modellierung der Entscheidungssituation notwendigen Datenmaterials als auch die gesellschaftliche Untermauerung der wertenden Elemente des Prozesses durch den breiten Einbezug zumindest wesentlicher Entscheidungsträger und Entscheidungsbetroffener, bedeutende Aspekte dar, die im Zuge einer Fortführung dieser Arbeit anzugehen wären.

Der Erfolg an beiden Fronten ist dabei im speziellen Fall wie auch (in theoretischer Hinsicht) im Allgemeinen nicht unerheblich für die letztliche Beantwortung der auf der strategischen Ebene zu Beginn der Arbeit formulierten Frage nach der grundsätzlichen Nutzbarkeit des zur Anwendung gebrachten Lösungsansatzes im Rahmen der beschriebenen (Gesamt-)Problemlage. Je größer an beiden Stellen die Fortschritte bzw. Potenziale sind und je größer die hiermit in Verbindung stehende zu erwartende Verlässlichkeit der berechneten Ergebnisse ist, desto eindeutiger wird die Nutzbarkeit des Ansatzes für die Stadtplanung bestätigt werden können.

Allerdings muss gerade in Zeiten vielfach eingeschränkter öffentlicher Haushalte bezweifelt werden, dass die dargelegten Anforderungen an eine umfassende qualitativ hochwertige Datenlage und den wünschenswerten umfangreichen Einbezug einer breiten gesellschaftlichen Basis in vollem Maße erfüllt werden können. Insofern wird es nicht selten erforderlich sein, in beiden Hinsichten mehr oder weniger große Abstriche zu akzeptieren. Das konkrete Ausmaß dieser Abstriche wird im Einzelfall in die Entscheidung einbezogen werden müssen, ob die in dieser Arbeit vorgestellte Herangehensweise als geeignetes Mittel angesehen werden kann, durch die Generierung entscheidungsunterstützender Informationen zur grundlegenden Problemlösung beizutragen. Statt einer unreflektierten Anwendung muss somit die Prüfung der jeweiligen konkreten Rahmenbedingungen zwingend der erste Schritt sein.

Der gewählte Ansatz, als Verbindung von der Fuzzy-Set-Theorie, dem AHP- sowie dem OWA-Ansatz entliehenen Methoden, erscheint jedoch auf Basis der in dieser Arbeit

gewonnenen Erkenntnisse zumindest als potenziell geeignet, um die komplexe Problemsituation strukturiert zu behandeln und die einzelnen Informationen sachlich fundiert aufbereitet zu einer angemessenen Entscheidungsgrundlage zusammenzuführen. Alle drei Elemente erlauben dabei wie in der Arbeit gezeigt werden konnte eine hohe Flexibilität, um eine möglichst realitätsnahe Modellierung der jeweils konkreten Entscheidungssituation, für die durchaus auch innerhalb des Betrachtungsmaßstabs Differenzierungen denkbar wären, zu gewährleisten.

Eine gewisse Herausforderung auch für weitere Untersuchungen könnte in methodischer Hinsicht darin bestehen, eine größere Flexibilität auch für potenzielle Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Entscheidungskriterien zu modellieren, die nicht nur in Bezug auf die hier betrachteten Umweltfaktoren von großer Bedeutung sein können. Diesem Thema konnte sich in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht gewidmet werden.

Besonders betont sei an dieser Stelle entsprechend der zweiten zu Beginn der Arbeit formulierten Zielsetzung der strategischen Ebene der trotz seiner inzwischen mehrere Dekaden umfassenden Vergangenheit nach wie vor als experimentell<sup>29</sup> angesehene OWA-Ansatz. Die Ausführungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit haben gezeigt, dass neben den nicht-kompensatorischen Aggregationsverfahren einer AND- bzw. OR-Verschneidung sowie der weit verbreiteten maximal kompensatorischen WLC-Methode die freie Definition der Risikobereitschaft und des erlaubten Trade-Off in verschiedenen Anwendungsfällen zu einer deutlich angemesseneren Modellierung beitragen kann. Gerade die Möglichkeit einer flexibleren Bestimmung des Ausmaßes, in dem die häufig konflikträchtige relative Bedeutung der einbezogenen Kriterien in der Entscheidungsgrundlage zur Geltung kommt, kann in dieser Hinsicht als bereicherndes Element angesehen werden. Auch eine mittlere Risikobereitschaft ist, wie an verschiedenen Stellen angeführt, unter Umständen noch als zu hoch anzusehen, während eine maximale Risikoaversion durch die vollständige Unterbindung eines Trade-Off nicht zuletzt auch eine Beschränkung im Hinblick auf eine abwägende Entscheidung bedeutet. Die durch den OWA-Ansatz gebotene Möglichkeit zur Berechnung unterschiedlicher Szenarien in Abhängigkeit beider Parameter kann vor diesem Hintergrund als hilfreiches und ggf. diskussionsförderndes Element im Entscheidungsfindungsprozess angesehen werden.

Im Hinblick auf die bei der theoretischen Betrachtung angeführte Problematik einer unter Anwendung der Software IDRISI oftmals intuitiven Bestimmung der Order

---

<sup>29</sup> Vgl. hierzu Eastman, 2006b, S. 116 sowie Shutidamrong/Lovett, 2008, S. 151.

Weights (vgl. Kap.3.5.2) kann unter Berücksichtigung der erarbeiteten Ergebnisse keine völlige Entkräftung gegeben werden. Problemverschärfend wirkt, dass wie am Beispiel der Zusammenführung aller Vorbelastungen zu einer umfassenden Beurteilungsgrundlage zu erkennen war (vgl. Kap. 4.4.2.1) mitunter schon eine kleine Veränderung der Gewichte eine nicht unerhebliche Auswirkung auf das Ergebnis haben kann. Um dieser Problematik zu begegnen wird es erforderlich sein, im Rahmen einer umfangreichen Sensitivitätsanalyse eine größere Anzahl häufig auch nur graduell unterschiedlicher Szenarien zu erzeugen um den Einfluss der Order Weights näher zu beleuchten.

Allerdings wird, trotz des Vorteils der Benutzerfreundlichkeit, eine Einschränkung der Entscheidungsregeln durch eine verhältnismäßig stark begrenzte Anzahl bestimmter vorgegebener Auswahlmöglichkeiten, wie sie u. a. durch den auf Boroushaki/Malczewski zurückgehenden Ansatz geboten werden, für viele Entscheidungssituationen als kritischer angesehen. Zudem könnte unter Umständen durch die Verwendung der Linguistic Quantifier der Eindruck einer geringeren Transparenz entstehen.

Die ursprünglich geplante Ausweitung der Sensitivitätsanalyse auf eine Überprüfung der Ergebnisse unter Verwendung des von Boroushaki/Malczewski entwickelten Ansatzes musste aus Zeitgründen leider entfallen. Die Gegenüberstellung der jeweiligen Resultate könnte allerdings möglicherweise zusätzliche interessante Erkenntnisse erzeugen. Angemerkt sei jedoch vor dem Hintergrund der in Kap. 3.1.2 angeführten theoretischen Grundlagen, dass das entsprechende Tool lediglich über die beiden in dem angegebenen Kapitel dargestellten Standardisierungsmöglichkeiten auf Basis endogener Faktoren verfügt. Die Generierung der Eignungskarten unter Berücksichtigung der exogenen fachlichen Vorgaben ist somit durch dieses Tool nicht zu leisten. Derartige Karten müssten somit als Eingangsdaten bereits vorhanden sein.

Alles in allem ist bei einer Anwendung des in dieser Arbeit genutzten Gesamtansatzes von außerordentlicher Bedeutung, die mehr oder weniger umfangreichen Beschränkungen transparent zu handhaben und bei der Auswertung zu beachten. Die berechneten Ergebnisse dürfen dabei keinesfalls als abschließende Entscheidung interpretiert werden (gewissermaßen als „Abwägung auf Knopfdruck“), sondern lediglich als entscheidungsunterstützende Information, die durchaus auch kritisch hinterfragt werden und zusammen mit weiteren in der Modellierung nicht enthaltenen Aspekten in die finale Entscheidung einfließen sollte. In letzter Hinsicht ist die eingangs der Arbeit angeführte Einschränkung in Erinnerung zu rufen, dass nicht alle entscheidungsrelevanten Faktoren

(mit effizienten Mitteln) räumlich darstellbar sein werden und somit eine vollständige Abbildung der real existierenden Entscheidungssituation in der Modellierung nicht zu gewährleisten sein wird.

Unter dieser Voraussetzung wird jedoch ab einem Mindestmaß an Datenqualität und legitimatorischer Untermauerung der genutzten Wertungen in zahlreichen Anwendungszusammenhängen nicht nur aufgrund der intensiven Auseinandersetzung mit der Modellierung der Entscheidungssituation ein nicht unerheblicher Erkenntnisgewinn bei den beteiligten Akteuren zu erzielen sein.

Vor diesem Hintergrund erscheint insgesamt die Übertragung einer derartigen Herangehensweise auf die hier betrachtete oder vergleichbare Fragestellungen der Stadt- bzw. Raumplanung in anderen Gebietseinheiten der gleichen oder höherer Planungsebenen als durchaus denkbar und vorbehaltlich einer reflektierten Prüfung der konkreten Rahmenbedingungen sinnvoll.

## **Verwendete Gesetze und Verordnungen**

### **4. BImSchV**

**Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Art. 1 d. V zur Neufassung und Änderung von Verordnungen zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV)** Ausfertigungsdatum: 24.07.1985 Vollzitat: "Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGBl. I S. 504), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 23. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2470)" Stand: Neugefasst durch Bek. v. 14.3.1997 I 504; zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 23.10.2007 I 2470

### **16. BImSchV**

**Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV)** Ausfertigungsdatum: 12.06.1990 Vollzitat: "Verkehrslärmschutzverordnung vom 12. Juni 1990 (BGBl. I S. 1036), geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 19. September 2006 (BGBl. I S. 2146)" Stand: Geändert durch Art. 3 G v. 19.9.2006 I 2146

### **22. BImSchV**

**Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft - 22. BImSchV)** Ausfertigungsdatum: 11.09.2002 Vollzitat: "Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. Juni 2007 (BGBl. I S. 1006)" Stand: Neugefasst durch Bek. v. 4.6.2007 I 1006

### **34. BImSchV**

**Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Lärmkartierung)** Ausfertigungsdatum: 06.03.2006 Vollzitat: "Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Lärmkartierung) vom 6. März 2006 (BGBl. I S. 516)"

### **BauGB**

**Baugesetzbuch** Ausfertigungsdatum: 23.06.1960 Vollzitat: "Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Dezember 2006 (BGBl. I S. 3316)" Stand: Neugefasst durch Bek. v. 23.9.2004 I 2414; zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 21.12.2006 I 3316

### **BBodSchG**

**Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten** Ausfertigungsdatum: 17.03.1998 Vollzitat: "Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214)" Stand: Zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 9.12.2004 I 3214

### **BBodSchV**

**Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung** Ausfertigungsdatum: 12.07.1999 Vollzitat: "Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3758)" Stand: Geändert durch Art. 2 V v. 23.12.2004 I 3758

### **BImSchG**

**Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)** Ausfertigungsdatum: 15.03.1974 Vollzitat: "Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2470)" Stand: Neugefasst durch Bek. v. 26.9.2002 I 3830; zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 23.10.2007 I 2470

### **BNatSchG**

**Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG)** Ausfertigungsdatum: 25.03.2002 Vollzitat: "Bundesnaturschutzgesetz vom 25. März 2002 (BGBl. I S. 1193), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 8. April 2008 (BGBl. I S. 686)" Stand: Zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 8.4.2008 I 686

### **LG NRW**

**Gesetz zur Sicherung des Naturhaushalts und zur Entwicklung der Landschaft (Landschaftsgesetz - LG).** In der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juli 2000 (GV. NRW. S. 568), Zuletzt geändert durch Artikel I des Gesetzes vom 19. Juni 2007 (GV. NRW. S. 226, 316).

### **LWG NRW**

**Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (Landeswassergesetz - LWG).** In der Fassung der Bekanntmachung vom 25. Juni 1995.

### **RL 2002/49/EG**

**Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm**

### **RL 96/82/EG**

**Richtlinie 96/82/EG des Rates vom 9. Dezember 1996 zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen. Änderung.** In Kraft getreten am 31.12.2003

### **ROG**

**Raumordnungsgesetz (Raumordnungsgesetz - ROG)** Ausfertigungsdatum: 18.08.1997 Vollzitat: "Raumordnungsgesetz vom 18. August 1997 (BGBl. I S. 2081, 2102), zuletzt geändert durch Artikel 10 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2833)" Stand: Zuletzt geändert durch Art. 10 G v. 9.12.2006 I 2833

### **WHG**

**Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG)** Ausfertigungsdatum: 27.07.1957 Vollzitat: "Wasserhaushaltsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 19. August 2002 (BGBl. I S. 3245), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S.666)" Stand: Neugefasst durch Bek. v. 19. 8.2002 I 3245; zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 10.5.2007 I 666

**WSG-Verordnung Binsheimer Feld**

Ordnungsbehördliche Verordnung zur Festsetzung des Wasserschutzgebietes für das Einzugsgebiet der Wassergewinnungsanlage Binsheimer Feld der Wasserverbund Niederrhein GmbH. Bezirksregierung Düsseldorf

<http://www.duisburg.de/vv/31/102010100000092220.php> (Stand: 14.10.2008)

**WSG-Verordnung Bockum**

Ordnungsbehördliche Verordnung zur Festsetzung des Wasserschutzgebietes für das Einzugsgebiet der Wassergewinnungsanlagen Bockum, Wittlaer, Kaiserswerth und Wittlaer-Werth der Stadtwerke Duisburg AG. Bezirksregierung Düsseldorf

<http://www.duisburg.de/vv/31/102010100000092220.php> (Stand: 14.10.2008)

**WSG-Verordnung Rumeln**

Ordnungsbehördliche Verordnung zur Festsetzung eines Wasserschutzgebietes für das Einzugsgebiet der Wassergewinnungsanlage Rumeln WG III der Stadtwerke Duisburg AG. Bezirksregierung Düsseldorf

<http://www.duisburg.de/vv/31/102010100000092220.php> (Stand: 14.10.2008)

## Literaturverzeichnis

- Bahadir, M. / Parlar, H. / Spiteller, M. (2000): Umweltlexikon. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1455 S.
- Baier, H. / Erdmann, F. / Holz, R. / Waterstraat, A. (Hrsg.) (2006): Freiraum und Naturschutz. Die Wirkungen von Störungen und Zerschneidungen in der Landschaft. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 692 S.
- Barkowski, D. / Bleier, M. / Heuz, U. / Kuylaars, K. (2002): Konzeption zur Erstellung einer digitalen Bodenbelastungskarte im Siedlungsbereich eines stark durch Immissionen belasteten Raumes am Beispiel der Stadt Duisburg. In: Bodenschutz, 7. Jahrgang, Heft Nr. 2, 2002, S. 55-61.
- Barsch, H. / Bork, H.-R. / Söllner, R. (Hrsg.) (2002): Landschaftsplanung – Umweltverträglichkeitsprüfung – Eingriffsregelung. Klett Verlag, Gotha/Stuttgart, 537 S.
- Battis, U. / Krautzberger, M. / Löhr, R.-P. (2007): Baugesetzbuch (BauGB), Kommentar. C.H. Beck, München, 1842 S.
- Bell, N. / Schuurmann, N. / Hayes, M. V. (2007): Using GIS-Based Methods of Multicriteria Analysis to Construct Socio-Economic Deprivation Indices. In: International Journal of Health Geographics, 2007, Nr. 6:17. <http://www.ij-healthgeographics.com/content/6/1/17> (Stand: 24.10.2008)
- Benedikt, J. / Reinberg, S. / Riedl, L. (2002): A GIS Application to Enhance Cell-Based Information Modeling. In: Information Sciences, 2002, Vol. 142, S. 151-160.
- Bezirksregierung Düsseldorf (2008): Luftreinhalteplan Ruhrgebiet. Teilplan „Ruhrgebiet West“. Eigendruck Bezirksregierung Düsseldorf, Düsseldorf, 209 S.
- Bitz, M. / Ewert, J. / Terstege, U. (2002): Investition. Multimediale Einführung in finanzmathematische Entscheidungskonzepte. Gabler Verlag, Wiesbaden, 392 S.
- Blaschke, T. (1997): Unschärfe und GIS: „Exakte“ Planung mit unscharfen Daten? In: Schrenk, M. (Hrsg.): Computergestützte Raumplanung – Beiträge zum Symposium CORP 1997 Wien, 381 S., S. 31-42.
- Blotevogel, H.H. / Jeschke, M. A.. (2003): Stadt-Umland-Wanderungen im Ruhrgebiet.

- Abschlussbericht zu dem Forschungsprojekt. <http://www.rvr-online.de/import/wirtschaft/Endbericht.pdf> (Stand: 22.10.2008)
- Borouhaki, S. / Malczewski, J. (2008): Implementing an Extension of the Analytical Hierarchy Process Using Ordered Weighted Averaging Operators with Fuzzy Quantifiers in ArcGIS. In: *Computers & Geosciences*, 2008, Vol. 34, S. 399-410.
- Brans, J.-P. / Mareschal, B. (2005): PROMETHEE Methods. In: Figueira, J. / Greco, S. / Ehrgott, M. (Hrsg.), 2005, *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*. Springer Verlag, New York, 1045 S., S.163-195.
- Carver, S. (1999): Developing Web-Based GIS/MCE: Improving Access to Data and Spatial Decision Support Tools. In: Thill, J-C. (Hrsg.), *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis. A Geographic Information Sciences Approach*. Ashgate Verlag, Aldershot/Brookfield, 394 S., S. 49-75.
- Chakhar, S. / Martel, J.-M. (2003): Enhancing Geographical Information Systems Capabilities with Multi-Criteria Evaluation Functions. In: *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2003, Vol. 7, Nr. 2, S. 47-71.
- Chakhar, S. / Mousseau, V. (2008a): Multicriteria Decision Making, Spatial. In: Shekhar, S. / Xiong, H. (Hrsg.): *Encyclopedia of GIS*, Springer Verlag, New York, 1370 S., S. 747-753.
- Chakhar, S. / Mousseau, V. (2008b): Multicriteria Spatial Decision Support Systems. In: Shekhar, S. / Xiong, H. (Hrsg.): *Encyclopedia of GIS*, Springer Verlag, New York, 1370 S., S. 753-758.
- Eastman, J. R. (2006a): IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing. Manual Version 15.0.
- Eastman, J. R. (2006b): IDRISI Andes. Tutorial. Manual Version 15.0.
- Ehrgott, M. / Wiecek, M.M. (2005): Multiobjective Programming. In: Figueira, J. / Greco, S. / Ehrgott, M. (Hrsg.), 2005, *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*. Springer Verlag, New York, 1045 S., S. 667-722.
- Figueira, J. / Greco, S. / Ehrgott, M. (2005): *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*. Springer Verlag, New York, 1045 S.

- Figueira, J. / Mousseau, V. / Roy, B. (2005): ELECTRE Methods. In: Figueira, J. / Greco, S. / Ehrgott, M. (Hrsg.), 2005, Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. Springer Verlag, New York, 1045 S., S. 133-162.
- Geldermann, J. / Zhang, K. / Rentz, O. (2003): Sensitivitätsanalysen für das Outranking-Verfahren PROMETHEE. In: Habenicht, W. / Scheubrein, B. / Scheubrein, R. (Hrsg.), 2003, Multi-Criteria- und Fuzzy-Systeme in Theorie und Praxis. Lösungsansätze für Entscheidungsprobleme mit komplexen Zielsystemen. Deutsche Universitäts - Verlag, Wiesbaden, 325 S., S. 127 – 151.
- Goversevski, P.V. / Jankowski, P. / Gessler, P.E. (2006): An Heuristic Approach for Mapping Landslide Hazard by Intergrating Fuzzy Logic with Analytic Hierarchy Process. In: Control and Cybernetics, 2006, Vol. 35, Nr. 1, S. 121-146.
- Grünig, R. / Kühn, R. (2005): Successful Decision-Making. A Systematic Approach to Complex Problems. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 231 S.
- Harth, M. (2006): Multikriterielle Bewertungsverfahren als Beitrag zur Entscheidungsfindung in der Landnutzungsplanung. Halle/Saale, 2006, 334 S. <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/06/06H106/t1.pdf> (Stand: 24.10.2008)
- Herzig, A. (2007): Entwicklung eines GIS-basierten Entscheidungsunterstützungssystems als Werkzeug nachhaltiger Landnutzungsplanung. Konzeption und Aufbau des räumlichen Landnutzungsmanagementsystems LUMASS für die ökologische Optimierung von Landnutzungsprozessen und –mustern. Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität Kiel, Kiel, 146 S.
- Hiller, D. A. / Meuser, H. (1998): Urbane Böden. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/ New York, 161 S.
- Hocevar, A. / Riedl, L. (2003): Vergleich verschiedener multikriterieller Bewertungsverfahren mit MapModels. In: Schrenk, M. (Hrsg.): Computergestützte Raumplanung – Beiträge zum Symposium CORP 2003. Wien, 561 S., S. 299-304.
- Jankowski, P. (1995): Integrating Geographical Information Systems and Multiple Criteria Decision-Making Methods. In: International Geographical Information Systems, 1995, Vol. 9, Nr. 3, S. 251-273.

- Jankowski, P. (2006): Integrating Geographical Information Systems and Multiple Criteria Decision-Making Methods: Ten Years After. In: Fischer, P. (Hrsg.): Classics from IJGIS: Twenty Years of the International Journal of Geographic Information Science and Systems. Taylor & Francis Group, Boca Raton, 572 S., S. 291-296.
- Jankowski, P. / Andrienko, N. / Andrienko, G. (2001): Map-Centred Exploratory Approach to Multiple Criteria Spatial Decision Making. In: International Journal of Geographical Information Science, 2001, Vol. 15, Nr. 2, S. 101-127.
- Jankowski, P. / Nyerges, T. (2003): Toward a Framework for Research on Geographic Information-Supported Participatory Decision Making. In: URISA Journal, 2003, Vol. 15, Nr. 1, S. 9-17.
- Jankowski, P. / Nyerges, T. (2001): Geographic Information Systems for Group Decision Making. Towards a Participatory, Geographic Information Science. Taylor & Francis Verlag, New York, 273 S.
- Jessel, B. / Tobias, K. (2002): Ökologisch orientierte Planung. Ulmer Verlag, Stuttgart, 470 S.
- Jiang, H. / Eastman, J.R. (2000): Application of Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation in GIS. In: International Journal of Geographical Information Science, 2000, Vol. 14, Nr. 2, S. 173-184.
- Joerin, F. / Theriault, M. / Musy, A. (2001): Using GIS and Outranking Multicriteria Analysis for Land-Use Suitability Assessment. In: International Journal for Geographical Information Science, 2001, Vol. 15, Nr. 2, S. 153-174.
- Jungermann, H. / Pfister, H.-R. / Fischer, K. (2005): Die Psychologie der Entscheidung. Eine Einführung. Spektrum Akademischer Verlag, München, 481 S.
- Kaule, G. (2002): Umweltplanung. Ulmer UTB Verlag, Stuttgart. 315 S.
- Krautzberger, M. (2008): Bodenschutz im städtebaulichen Planungsrecht. Zur Bodenschutzklausel des Baugesetzbuchs. In: Flächenmanagement und Bodenordnung (FuB) – Zeitschrift für Liegenschaftswesen, Planung und Vermessung, 2008, Ausgabe 3, S. 117-123.

- Kuschnerus, U. (2005): Der sachgerechte Bebauungsplan. Handreichungen für die kommunale Planung. VHW Verlag, Bonn, 458 S.
- Kuylars, K. (2007): Stand der Arbeiten zur Erstellung der digitalen Bodenbelastungskarte, Öffentliche Mitteilungsvorlage (Drucksachen-Nr. 06-2247), Duisburg, 8 S. <http://www.duisburg.de/ratsinformationssystem/bi/infobi.php> (Stand: 24.10.2008)
- Lang, S. / Blaschke, T. (2007): Landschaftsanalyse mit GIS. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 404 S.
- LANUV (2007): Leitfaden zur Erstellung digitaler Bodenbelastungskarten. Teil II: Siedlungsbereiche (LANUV-Arbeitsblatt 1). Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW. Recklinghausen, 108 S.
- LANUV (2008): Bodenbelastungskarte Ruhrgebiet. LANUV-Fachbericht 7. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW. Recklinghausen, 29 S.
- Laux, H. (1998): Entscheidungstheorie. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 480 S.
- LDS NRW (2008): Kommunalprofil Duisburg (Stand: 09.07.2008) Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen. <http://www.lds.nrw.de/kommunalprofil/105112.pdf> (Stand: 22.10.2008)
- LUA (2004): Humanmedizinische Wirkungsuntersuchungen innerhalb kleinräumiger Belastungsareale mit umschriebenen Belastungsschwerpunkten („Hot Spot“ - Untersuchungen). Fachberichte Landesumweltamt NRW 5, Essen, 288 S. [http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fachb05/fb05\\_start.htm](http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fachb05/fb05_start.htm) (Stand: 24.10.2008)
- LUA (2003): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Oberböden Nordrhein-Westfalens - Auswertung aus dem Fachinformationssystem Stoffliche Bodenbelastung (FIS StoBo). LUA – Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. [http://www.lua.nrw.de/boden/bodenschutz/HGW\\_Internet\\_2003-3.pdf](http://www.lua.nrw.de/boden/bodenschutz/HGW_Internet_2003-3.pdf) (Stand: 12.09.2008)

- LUA (2005): Feinstaubkohortenstudie Frauen in NRW. Langfristige gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub in Nordrhein-Westfalen 2002-2005. Fachbericht 7/2005. Essen, 84 S.  
[http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fachb07/fachbericht7\\_luanrw.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fachb07/fachbericht7_luanrw.pdf) (Stand: 24.10.2008)
- Malczewski, J. (2006a): Integrating Multicriteria Analysis and Geographic Information Systems: The Ordered Weighted Averaging (OWA) Approach. In: International Journal Environmental Technology and Management, 2006, Vol. 6, Nr. 1/2, S. 7-19.
- Malczewski, J. (2006b): GIS-based Multicriteria Decision Analysis: A Survey of the Literature. In: International Journal of Geographical Information Science, 2006, Vol. 20, Nr. 7, S. 703-726.
- Malczewski, J. (2006c): Ordered Weighted Averaging with Fuzzy Quantifiers: GIS-based Multicriteria Evaluation for Land-Use Suitability Analysis. In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006, Vol. 8, S. 270-277.
- Malczewski, J. (2006d): Multicriteria Decision Analysis for Collaborative GIS. In: Balram, S. / Dragicevic (Hrsg.), 2006, Collaborative Geographic Information Systems, Idea Group Publishing, London, 364 S., S. 167- 185.
- Malczewski, J. (2004): GIS-based Land-Use Suitability Analysis: A Critical Overview. In: Progress in Planning, 2004, Vol. 62, S. 3-65.
- Malczewski, J. (2002): Fuzzy Screening for Land Suitability Analysis. In: Geographical & Environmental Modelling, 2002, Vol. 6, Nr. 1, S. 27-39.
- Malczewski, J. (1999): GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons Verlag, New York, 392 S.
- Malczewski, J. / Chapman, T. / Flegel, C. / Walters, D. / Shrubsole, D. / Healy, M. A. (2003): GIS – Multicriteria Evaluation with Ordered Weighted Averaging (OWA): Case Study of Developing Watershed Management Strategies. In: Environment and Planning A, 2003, Vol. 35, S. 1769-1784.
- Malczewski, J. / Rinner, C. (2005): Exploring Multicriteria Decision Strategies in GIS with Linguistic Quantifiers: A Case Study of Residential Quality Evaluation. In: Journal of Geographical Systems, 2005, Vol. 7, Nr. 2, S. 249-268.

- Martel, J.-M. (2005): Other Outranking Approaches. In: Figueira, J. / Greco, S. / Ehrgott, M. (Hrsg.), 2005, Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. Springer Verlag, New York, 1045 S., S.197-262.
- MSWKS & MUNLV (2005): Berücksichtigung von Flächen mit Bodenbelastungen, insbesondere Altlasten, bei der Bauleitplanung und im Baugenehmigungsverfahren (Altlastenerlass). Gemeinsamer Runderlass des Ministeriums für Städtebau und Wohnen, Kultur und Sport und des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (14.03.2005). <http://www.lanuv.nrw.de/altlast/Erlass%20Bauleitplanung.pdf> (Stand: 24.10.2008)
- MUNLV (2007a): Umweltbericht NRW 2006. MUNLV, Düsseldorf, 427 S.
- MUNLV (2007b): Abstände zwischen Industrie- bzw. Gewerbegebieten und Wohngebieten im Rahmen der Bauleitplanung und sonstige für den Immissionsschutz bedeutsame Abstände – Abstandserlass -. Runderlass des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Düsseldorf, 228 S.
- MUNLV (2008): Lärmaktionsplanung. Runderlass des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (7.2.2008). [http://www.umgebungslaerm.nrw.de/Dokumente/Gesetze/Erlass\\_Laermaktionsplanung.pdf](http://www.umgebungslaerm.nrw.de/Dokumente/Gesetze/Erlass_Laermaktionsplanung.pdf) (Stand: 24.10.2008)
- Nickel, S. / Puerto, J. / Rodriguez-Chia, A. M. (2005): MCDM Location Problems. In: Figueira, J. / Greco, S. / Ehrgott, M. (Hrsg.), 2005, Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. Springer Verlag, New York, 1045 S., S. 761-795.
- O'Hagan, M. (1990): A Fuzzy Neuron Based Maximum Entropy-Ordered Weighting Averaging. In: Bouchon-Meunier, B. / Yager, R.R. / Zadeh, L.A. (Hrsg.), 1990, Uncertainty in Knowledge Bases. Springer Verlag, Berlin, S. 598-609.
- Poschmann, C. / Riebenstahl, C. / Schmidt-Kallert, E. (1998): Umweltplanung und –bewertung. Klett-Perthes Verlag, Gotha/Stuttgart, 150 S.
- Prinz, T. (2003): GIS-gestützte Bewertungsverfahren in einer zukunftsorientierten Stadt- und Regionalplanung. In: Strobl/Blaschke/Griesebner (Hrsg.), 2003,

- Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XV, Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg, S. 424-429.
- Rinner, C. (2003): Web-Based Spatial Decision Support: Status and Research Directions. In: Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 2003, Vol. 7, Nr. 1, S. 14-31.
- Roy, B. (1996): Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 316 S.
- Saaty, T. L. (2005): The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making. In: Figueira, J. / Greco, S. / Ehrgott, M. (Hrsg.), 2005, Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. Springer Verlag, New York, 1045 S., S. 345-407.
- Saaty, T. L. (1980): The Analytic Hierarchy Process. Planning, Priority Setting, Ressource Allocation. McGraw-Hill, New York, 287 S.
- Schwarz-vonRaumer, H.-G. (1999): Bewertungsverfahren: Bedeutung in der raumbezogenen Planung, Methodik und GIS-Einsatz. In: Kilchenmann/Schwarz-vonRaumer (Hrsg.), GIS in der Stadtentwicklung. Methoden und Fallbeispiele. Springer Verlag, Berlin /Heidelberg, 1999, 244 S., S. 35- 61.
- Shutidamrong, F. / Lovett, A. (2008): ‚Riding an Elephant to Catch a Grasshopper?‘: Applying and Evaluating Techniques for Stakeholder Participation in Land-Use Planning within the Kae Watershed, Northern Thailand. In: Lovett/Appleton (Hrsg.), GIS for Environmental Decision-Making, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2008, 259 S., S. 149-164.
- SKF/TAA (2005): Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung – Umsetzung § 50 BImSchG. Störfall-Kommission (SKF) / Technischer Ausschuss für Anlagensicherheit (TAA), 59 S. [http://www.kas-bmu.de/publikationen/sfk/sfk\\_taa\\_gs\\_1.pdf](http://www.kas-bmu.de/publikationen/sfk/sfk_taa_gs_1.pdf) (Stand: 27.10.2008)
- SRU (2008): Umweltgutachten 2008. Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Berlin, 1040 S. <http://www.umweltrat.de/frame02.htm> (Stand: 24.10.2008)

- Stock, P. / Gründler, K. (2007): Informationsmanagement bei der Umweltprüfung des regionalen Flächennutzungsplans für den Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main. In: UVP-Report, 2007, Nr. 1+2, S. 68-75.
- Stüer, B. (2006): Der Bebauungsplan. Städtebaurecht in der Praxis. Verlag C. H. Beck, München, 2006, 736 S.
- Sukopp, H. / Wittig, R. (1998): Stadtökologie. Ein Fachbuch für Studium und Praxis. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena/Lübeck/Ulm, 474 S.
- Thill, J.-C. (1999): Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis. A Geographic Information Sciences Approach. Ashgate Verlag, Aldershot/Brookfield, 394 S.
- Turskis, Z. / Zavadskas, E. / Zagorskas, J. (2006): Sustainable City Compactness Evaluation on the Basis of GIS and Bayes Rule. In: International Journal of Strategic Property Management, 2006, Vol. 10, S. 185 – 207.
- Von Haaren, C. (Hrsg.) (2004): Landschaftsplanung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 527 S.
- Weiland, U. / Wohlleber-Feller, S. (2007): Einführung in die Raum- und Umweltplanung. Schöningh Verlag, Paderborn, 322 S.
- Yager, R. R. (1988): On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decisionmaking. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1988, Vol. 18, Nr. 1, S. 183-190.
- Zadeh, L. A. (1983): A Computational Approach to Fuzzy Quantifiers in Natural Languages. In: Computers and Mathematics with Applications, 1983, Vol. 9, S. 149-184.
- Zadeh, L. A. (1965): Fuzzy Sets. In: Information and Control, Vol. 8, 1965, S. 338-353.
- Zhou, X. / Lin, H. (2008): Sensitivity Analysis. In: Shekhar, S. / Xiong, H. (Hrsg.): Encyclopedia of GIS, Springer Verlag, New York, 1370 S., S. 1046-1048.