



> **Die Konzepte des Virtuellen Wassers
und des Wasser-Fußabdrucks**

Helmar Schubert

acatech MATERIALIEN – NR. 4

Diskussionspapier für die acatech Projektgruppe
„Georessource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel“

Impressum

Autor:

Prof. Dr. Ing. habil. Helmar Schubert
Karlsruher Institut für Technologie KIT, Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe
E-Mail: helmar.schubert@kit.edu

Projekt:

Geoessource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel

Empfohlene Zitierweise:

Helmar Schubert: Die Konzepte des Virtuellen Wassers und des Wasser-Fußabdrucks, acatech Materialien Nr. 4, München 2011.

Reihenherausgeber:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2011

Geschäftsstelle	acatech Hauptstadtbüro
Residenz München	Unter den Linden 14
Hofgartenstraße 2	10117 Berlin
80539 München	

T +49(0)89/5203090	T +49(0)30/206309610
F +49(0)89/5203099	F +49(0)30/206309611

E-Mail: info@acatech.de
Internet: www.acatech.de

ISSN: 2191-8481/ISBN: 978-3-942044-99-8

© acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften 2011

Redaktion: Dr. Amelie Bucker, Monika Damm
Layout/Konzeption: acatech
Konvertierung und Satz: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS, Sankt Augustin

INHALT

EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG	5
1. ALLGEMEINES, VORAUSSETZUNGEN, VEREINBARUNGEN	7
2.1 Wichtige Eigenschaften von Wasser	7
2.2 Globaler Wasserkreislauf	8
2.3 Das Wasser der Erde, Wassernutzung	8
2. DAS GEDANKLICHE KONZEPT DES VIRTUELLEN WASSERS	12
3.1 Definitionen	12
3.2 Anwendung des Konzepts	12
3. DAS KONZEPT DES WASSER-FUSSABDRUCKES	17
3.1 Definitionen	17
3.2 Anwendung des Konzepts	17
3.3 Blauer, Grüner und Grauer Wasser-Fussabdruck	18
3.4 Sickerwasser und Wasser-Fußabdruck	20
4. ANALYSE DER KONZEPTE DES VIRTUELLEN WASSERS UND DES WASSER-FUSSABDRUCKS	22
4.1 Der Handel mit Produkten als Maß für den Virtuellen Wassertransport	22
4.2 Der Wasser-Fußabdruck	23
4.3 Das Konzept des Wasser-Fußabdrucks für Regionen	26
4.3.1 Das Konzept für kleine Regionen	26
4.3.2 Brauchbarkeit des Konzepts für die Region Berlin-Brandenburg	26
5. VORSCHLAG FÜR EIN MODIFIZIERTES KONZEPT DES VIRTUELLEN WASSERS	28
5.1 Einschränkungen der Leistungsfähigkeit des seitherigen Konzepts	28
5.2 Modifiziertes Konzept als Ergänzung und Erweiterung des bisherigen Konzepts	28
5.3 Das modifizierte Konzept als Informationsquelle für ein nachhaltiges Wassermanagement	31
5.4 Anwendung des modifizierten Konzepts auf die Region Berlin-Brandenburg	32
6. GLOBALER WANDEL UND VIRTUELLES WASSER	33
6.1 Konsequenzen und Empfehlungen aus globaler Sicht	33
6.2 Konsequenzen und Empfehlungen für die Region Berlin-Brandenburg	34
7. AUSBLICK	36
8. ABKÜRZUNGEN UND DIMENSIONEN	37
9. LITERATUR	38

EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Das gedankliche Konzept des Virtuellen Wassers wurde vor über 15 Jahren von T. Allen entwickelt und hat inzwischen Eingang in die Massenmedien wie Fernsehen, Hörfunk, Zeitungen und Zeitschriften gefunden. Als Virtuelles Wasser wird das zur Herstellung eines Produkts oder zur Erbringung einer Dienstleistung benötigte Süßwasser definiert, das hier vereinfacht nur als Wasser bezeichnet wird. Virtuelles Wasser ist also real zur Produktion erforderlich, es ist jedoch im fertigen Erzeugnis bis auf einen vernachlässigbar kleinen Rest nicht vorhanden, sondern nur gedanklich zugeordnet. Die Anwendungen dieses Konzepts werden beschrieben und es wird erläutert, weshalb dieses Konzept in der praktischen Ausführung so schwierig ist. In den letzten zehn Jahren ist ein umfangreiches Schrifttum über Virtuelles Wasser erschienen. Charakteristisch sind die sehr großen Schwankungsbreiten der erhobenen Daten für das Virtuelle Wasser bei gleichen Produkten selbst aus vergleichbaren Herstellorten. Die Ursachen für die großen Schwankungsbreiten werden diskutiert. Mitunter sind die Angaben auch widersprüchlich; teilweise haben die Mengenangaben unzutreffende Dimensionen. Überwiegend werden sehr genaue Zahlenwerte angegeben, die jedoch einer Prüfung nicht standhalten und eine Genauigkeit vorgeben, die tatsächlich nicht vorhanden ist. Im Rahmen der vorgelegten Arbeit wurden daher die Mengenangaben für das Virtuelle Wasser grob gerundet und in einigen Fällen Schwankungsbreiten vermerkt. Angaben über den Virtuellen Wassergehalt einiger Güter werden zusammengestellt und diskutiert. Für eine detaillierte Auswertung des Datenmaterials auf der Basis von Verteilungen wären weitere Informationen und die Originaldaten erforderlich, die jedoch nicht verfügbar waren. Die meisten Publikationen über Virtuelles Wasser beziehen sich auf landwirtschaftliche Produkte, die auch in dieser Arbeit schwerpunktmäßig behandelt werden. Die Einschränkung ist vertretbar, da rund 70 % des globalen Virtuellen Wassers landwirtschaftlichen Produkten zugeordnet ist.

Auf der Grundlage des Prinzips des Virtuellen Wassers hat A. Hoekstra den Wasser-Fußabdruck (water footprint) entwickelt, der das gesamte Wasservolumen (einschließlich des Virtuellen Wassers) angibt, das pro Zeiteinheit von einer oder mehreren Personen, von Unternehmen oder von Personen in bestimmten Regionen benötigt wird. Der globale Wasser-Fußabdruck gibt die insgesamt von allen Menschen genutzte Wassermenge pro Zeiteinheit an. Meist wird das insgesamt pro Jahr genutzte Wasservolumen angegeben.

In einigen Arbeiten wird der Wasser-Fußabdruck ohne Zeitbezug auf die Menge eines Produkts bezogen. Der so definierte Wasser-Fußabdruck stimmt dann mit dem Virtuellen Wassergehalt überein. Die Bedeutung und Anwendung des Konzepts des Wasser-Fußabdrucks wird an Beispielen erläutert. Ebenso wie beim Virtuellen Wasser zeigt sich, dass die praktische Ausführung dieses Konzepts schwierig ist und viele Einflussgrößen nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt werden. So wurde im ursprünglichen Konzept die Wasserbeschaffenheit nicht in Betracht gezogen, die in neueren Arbeiten durch Einführung des Grünen, Blauen und Grauen Wasser-Fußabdrucks zumindest näherungsweise berücksichtigt wird. Grün bedeutet in diesem Fall, dass es sich um das erneuerbare Niederschlagswasser handelt. Blau bezieht sich auf Grundwasser und Oberflächengewässer. Der Graue Wasser-Fußabdruck ist eine fiktive Größe, die den Grad der Wasserverschmutzung bei der Herstellung von Produkten charakterisiert. Trotz einiger Schwierigkeiten bedeutet die Einteilung in den Grünen und Blauen Wasser-Fußabdruck eine zweckmäßige Erweiterung des Konzepts. Der eingeführte fiktive Graue Wasser-Fußabdruck ist, wie die Diskussion zeigt, noch nicht in allen Fällen ein zufriedenstellender Vorschlag.

Das Konzept des Virtuellen Wasser sowie die Überlegungen zum Wasser-Fußabdruck werden analysiert sowie Vor- und Nachteile zusammengestellt. Beim globalen Handel mit Virtuellen Wasserströmen von Agrargütern zeigt sich, dass über 90 % des Wassers aus Grünem Virtuellen Wasser besteht, das aus dem Niederschlag besteht und mit keinen oder nur sehr geringen Opportunitätskosten verbunden ist. Dies bedeutet, dass nur ein sehr kleiner Teil des gehandelten Virtuellen Wassers kritisch sein kann hinsichtlich einer Übernutzung (exportierendes Land) oder Schonung (importierendes Land) der eigenen Ressource Wasser. Das Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdrucks liefert keinen zufriedenstellenden Beitrag zur Frage eines schonenden Umgangs mit Wasser oder zur Herausforderung eines nachhaltigen Wassermanagements. Angaben darüber, wie hoch der besonders kritische, also nicht nachhaltig entnommene Anteil des gesamten Virtuellen Wassers ist, enthält das Konzept nicht.

Das Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdrucks ist interessant zur Untersuchung globaler Virtueller Wasserströme und unterstreicht, dass der Feldanbau von Kulturpflanzen große Wassermengen benötigt. In der Regel genügen grobe Schätzwerte über die Virtuellen Wassermengen, um ein

Bild von den globalen Mengenströmen zu erhalten. Die Anwendung des Konzepts auf kleine Regionen erfordert jedoch, wie die Analyse zeigt, genauere Angaben und weitere Untersuchungen, die in der Regel nicht im Rahmen der bisherigen Arbeiten zur Verfügung stehen. Wie gezeigt wird, ist die Brauchbarkeit des Konzepts für die Region Berlin-Brandenburg daher eingeschränkt. Ohne weitere Detailinformationen ist auf der Basis der bisher erhobenen Daten ein merklicher Nutzen des Konzepts des Wasser-Fußabdrucks bzw. des Virtuellen Wassers sowohl für die Produzenten als auch für die Konsumenten der Fokusregion nicht erkennbar. Das bestehende Konzept ist kaum hilfreich, um Fragen einer guten Wasserwirtschaft, einer nachhaltigen Landnutzung und allgemein eines nachhaltigen Gebrauchs der Ressource Wasser zu beantworten.

Daher wird im Rahmen der Arbeit vorgeschlagen, das derzeitige Konzept zu erweitern und so zu modifizieren, dass nur derjenige Anteil des zur Herstellung von Produkten benötigten Wassers berücksichtigt wird, der am Ort der Herstellung nicht nachhaltig entnommen oder über ein bestimmtes Maß verschmutzt wird. Entsprechendes gilt auch für das zur Erbringung von Dienstleistungen erforderliche Wasser. Die Vor- und Nachteile des erweiterten Konzepts werden diskutiert und eine vereinfachte Methode vorgeschlagen, wie das nicht nachhaltig entnommene Wasser zumindest näherungsweise zu erfassen ist. Das modifizierte Konzept identifiziert diejenigen Bereiche, Regionen und Güter, bei denen eine Übernutzung der Ressource Wasser stattfindet und quantifiziert diese Übernutzung. Damit liefert es nützliche Informationen sowohl für die Produzenten als auch für die Verbraucher und dient als Informationsquelle für ein nachhaltiges Wassermanagement. Die Anwendung des modifizierten Konzepts auf die Region Berlin-Brandenburg wird diskutiert.

Abschließend wird das Thema „Globaler Wandel und Virtuelles Wasser“ behandelt. Daraus ergeben sich Konsequenzen sowie Empfehlungen aus globaler Sicht und für die Region Berlin-Brandenburg, die zusammengestellt werden. In einem Ausblick werden die noch offenen Fragen diskutiert und der vorrangige Forschungsbedarf genannt. Das vorgeschlagene Konzept des nicht nachhaltigen Virtuellen Wassers benötigt weitere Forschungen und vor allem Datenerhebungen.

Die vorgelegte Arbeit ist in acht Kapitel unterteilt. Um auch einzelne Kapitel und Unterkapitel getrennt voneinander studieren zu können, werden wichtige Definitionen und für das Verständ-

nis wesentliche Erkenntnisse wiederholt oder auf Erläuterungen in anderen Kapiteln hingewiesen.

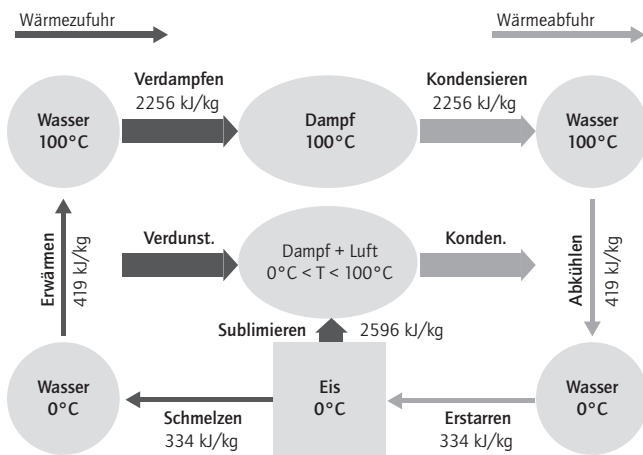
Der Autor dankt Herrn Professor Dr. Hans-Georg Frede für viele hilfreiche Hinweise und Verbesserungen der Arbeit.

1. ALLGEMEINES, VORAUSSETZUNGEN, VEREINBARUNGEN

1.1 WICHTIGE EIGENSCHAFTEN VON WASSER

Wasser kommt auf der Erde als einzige natürliche Substanz in großen Mengen als Feststoff (Eis), Flüssigkeit und Gas (Wasserdampf) vor und besitzt eine hohe Verdampfungswärme sowie eine hohe Wärmekapazität. Die verlustfreie Umwandlung von reinem Wasser in den festen, flüssigen und gasförmigen Zustand bei einem Umgebungsdruck von 1 bar zeigt schematisch Abbildung 1.

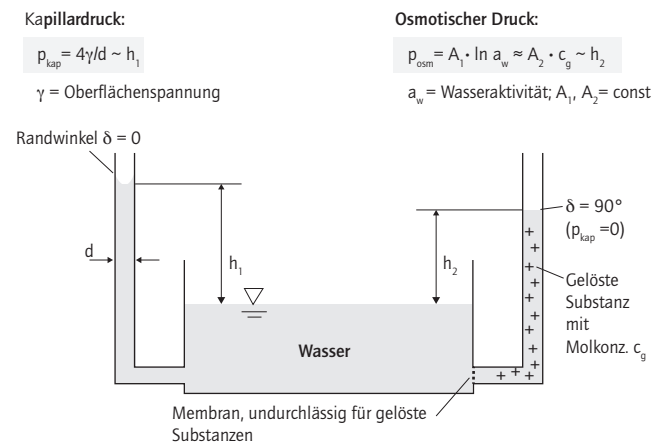
Abbildung 1: Schematische Darstellung der Umwandlung von Wasser in den festen, flüssigen und gasförmigen Zustand bei 1 bar (ohne Verluste).



Durch Wärmezufuhr (Schmelzwärme 334 kJ/kg bei 0°C) kann Eis schmelzen, Wasser erhitzt werden und schließlich verdampfen (Verdampfungswärme 2256 kJ/kg bei 100°C). Bei Wärmeabfuhr kommt es zur Kondensation des Dampfes, zur Abkühlung und schließlich zur Eisbildung. Wasserdampf kann bei Wärmezufuhr aus dem flüssigen Zustand auch in die Atmosphäre, also ein Dampf-Luft-Gemisch, gelangen. Man spricht dann von Verdunstung, bei Wärmeabfuhr von Kondensation, beispielsweise bei einer Wolkenbildung. Eine Wasserverdunstung, die in Natur und Technik häufig zur Kühlung dient, kann nur eintreten, wenn die Luft nicht mit Wasserdampf gesättigt ist, also die relative Luftfeuchte unterhalb von 100 % liegt. Umgekehrt kann Wasserdampf nur bei gesättigter Luft kondensieren. Da die Wasserdampfaufnahme in Luft mit zunehmender Temperatur steigt, lassen sich Verdunstung und Kondensation durch Änderung der Temperatur beeinflussen. Für genaue Berechnungen ist zu beachten, dass die Verdampfungswärme bei einer Verdunstung des

Wassers in das Dampf-Luft-Gemisch geringfügig von der Temperatur abhängt. Bei 0°C liegt die Verdampfungswärme etwa um 2 % höher als bei 100°C. Entsprechendes gilt für die Kondensation von Wasser aus einem Dampf-Luft-Gemisch. Schließlich kann Wasserdampf auch direkt aus dem festen Zustand in den gasförmigen Zustand übergehen, wenn die Sublimationswärme zugeführt wird. Der umgekehrte Fall, also der Übergang vom gasförmigen unmittelbar in den festen Aggregatzustand, wird als Resublimation bezeichnet. Wassereis trocknet bei nicht mit Wasserdampf gesättigter Luft und Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes durch Sublimation, ein Beispiel für eine Resublimation ist die Raureifbildung.

Abbildung 2: Kapillarität und Osmose. Die Wasseraktivität ist der Quotient des Wasser-Dampfdrucks über der Lösung zum Wasserdampfdruck über reinem Wasser mit einer ebenen Oberfläche (Kapillardruck $p_{kap} = 0$).



Weitere, für diese Arbeit wichtige Eigenschaften des Wassers sind die für Flüssigkeiten geringe Viskosität und die hohe Oberflächenspannung. Die geringe Viskosität des Wassers begünstigt einen schnellen Zu- und Abfluss, durch die hohe Oberflächenspannung werden Kapillareffekte möglich, welche die Wasserspeicherkapazität und den Wassertransport im Boden (Schubert, 1982) sowie den Verdunstungsverlauf an der Bodenoberfläche maßgeblich beeinflussen. Ferner sind viele Stoffe in Wasser löslich, dadurch ergeben sich osmotische Effekte, die beispielsweise Einfluss auf den Wassertransport an Membranen wie Zellwände haben oder für die Wasserreinigung genutzt werden können. Kapillarität und Osmose sind vereinfacht in Abbil-

dung 2 erläutert. Der Kapillardruck steigt in benetzenden Systemen, bei denen der Randwinkel möglichst gering ist, mit kleiner werdendem Porendurchmesser an. Der osmotische Druck nimmt mit wachsender Molkonzentration der gelösten Substanz bzw. der Wasseraktivität zu (Abb. 2). Da viele Stoffe in Wasser gut löslich sind oder darin mittels Tensiden feindispers verteilt werden können, besitzt Wasser gute Transport- und Reinigungseigenschaften. Wegen seiner großen Wärmekapazität und seiner hohen Beweglichkeit beeinflusst Wasser entscheidend das Klima der Erde und ist maßgeblich für viele Wettergeschehnisse zuständig. Schließlich ist noch zu vermerken, das Wasser eine chemisch sehr stabile Substanz ist und bekanntlich für alles Leben auf der Erde unverzichtbar ist.

1.2 GLOBALER WASSERKREISLAUF

Die im ersten Abschnitt von Kapitel 1.1 kurz zusammengestellten Eigenschaften liefern die Basis für den globalen Wasserkreislauf, der seine Energie durch die Sonne bezieht. *(Anmerkung: Da die anfallenden Wassermengen sehr groß sind, wird in der überwiegenden Fachliteratur das jährliche Wasservolumen in der Einheit km^3/a angegeben (vgl. beispielsweise Zehnder, 2002; Lehn und Parodi, 2009), mitunter jedoch auch in Gm^3/a bzw. Gm^3/yr (Hoekstra, 2003a; Hoekstra und Chapagain, 2008). Die Einheit km^3/a , im Sinne des Internationalen Einheitensystems SI in der Bedeutung $(\text{km})^3/\text{a}$, lässt sich wie folgt umrechnen: $1 \text{ km}^3/\text{a} = 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$. Dagegen gilt für die SI-Einheit Gm^3/a die Umrechnung $1 \text{ Gm}^3/\text{a} = 10^{27} \text{ m}^3/\text{a}$ (G als Abkürzung von Giga in der Bedeutung von 10^9). Eine Rücksprache mit dem Autor Hoekstra hat ergeben, dass die Zahlenwerte vor der Einheit Gm^3/a in der Bedeutung $\text{km}^3/\text{a} = 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ gemeint sind. Entsprechendes gilt für die Einheit Mm^3/a bzw. Mm^3/yr (Chapagain und Hoekstra, 2010). Mm^3/a ist gleichbedeutend mit $10^{18} \text{ m}^3/\text{a}$, gemeint in der zitierten Arbeit sind jedoch $10^6 \text{ m}^3/\text{a}$.)*

Wasser verdunstet von den Weltmeeren (71 % der Erdoberfläche) und der Landfläche (29 % der Erdoberfläche), kondensiert durch Wolkenbildung in der Atmosphäre und liefert Niederschläge, die im langjährigen Mittel über der Landfläche $110.000 \text{ km}^3/\text{a}$ (bezogen auf die Landfläche ergeben sich $750 \text{ mm}/\text{a}$) betragen. Da über den Weltmeeren die Verdunstung um $40.000 \text{ km}^3/\text{a}$ größer ist als der Niederschlag, ist die Verdunstung über der Landfläche ($70.000 \text{ km}^3/\text{a}$ entsprechend $480 \text{ mm}/\text{a}$) um den gleichen Betrag kleiner als der dortige Niederschlag. Der Wasserkreislauf ist geschlossen, daher fließen im langjährigen Mittel $40.000 \text{ km}^3/\text{a}$ vom Land wieder ins Meer. Die genannten Zahlenwerte sind

gerundete Daten aus der Literatur (Endlicher, 1991; Zehnder, 2002). Durch den Wasserkreislauf wird nicht nur Wasser auf die Landfläche der Erde verteilt, sondern wie in einer Destillationsanlage auch gereinigt. Aus dem Salzwasser der Meere wird durch Verdunstung und anschließende Kondensation Süßwasser.

1.3 DAS WASSER DER ERDE, WASSERNUTZUNG

Neben der nahezu unbegrenzten Salzwassermenge des Meeres sind auf der Erde weniger als 3 % dieser Menge als Süßwasser vorhanden, das im Folgenden aus Gründen einer verkürzten Schreibweise als Wasser bezeichnet wird. Nur ein sehr kleiner Anteil, etwa 0,1 % dieses Wassers (Shiklomanov, 1993; Zehnder, 2002), ist auf der Erde so gespeichert, dass es von der belebten Natur und vom Menschen unmittelbar genutzt werden kann. Für eine nachhaltige Nutzung muss die gespeicherte Wassermenge im langjährigen Mittel konstant bleiben. Dies bedeutet, dass für eine nachhaltige Wassernutzung nur der Niederschlag als erneuerbare Ressource zur Verfügung steht.

Da ein Teil dieses Niederschlags auf die klimatisch ungeeignete und damit kaum besiedelte Landfläche fällt und von dort auch nicht in besiedelte Gebiete abfließt, steht nur ein Teil des Niederschlags auf das Festland der Erde für den Menschen zur Verfügung. Schließlich ist zu berücksichtigen, dass etwa $40.000 \text{ km}^3/\text{a}$ vom Land ins Meer zurückfließen (vgl. Kap. 1.2). Welcher Anteil dieser Wassermenge derzeit vom Menschen genutzt wird und welcher Anteil unter Beachtung technischer und ökonomischer Gesichtspunkte nutzbar wäre, kann aus Literaturdaten nicht ausreichend sicher abgeschätzt werden. Hierauf wird zum Ende dieses Kapitels zurückgekommen. Zu beachten sind beispielsweise die Art der Nutzung, die derzeit nicht beherrschbaren und damit nicht nutzbaren Wassermassen bei extrem hohen Niederschlägen und Überschwemmungen sowie die Möglichkeit, Wasser durch Klärung mehrfach zu nutzen.

Die Art der Nutzung ist von großer Bedeutung. Wird lediglich die potentielle und kinetische Energie des Wassers beispielsweise in Wasserkraftwerken genutzt, ist die weitere Nutzung in der Regel uneingeschränkt möglich. Ähnlich verhält es sich bei der Nutzung von Wasser zum Transport, beispielsweise in der Schifffahrt, wobei jedoch mögliche Verunreinigungen des Wassers zu beachten sind. In den meisten anderen Fällen ist jedoch mit einer Veränderung der Wasserbeschaffenheit zu rechnen, wie etwa für die Trinkwasserversorgung, bei der Nutzung von Wasser zur Reinigung in Industrie, Gewerbe und Haushalt sowie

zur Bewässerung in Gartenbau und Landwirtschaft. Große Wassermengen werden für Kühlzwecke eingesetzt. Hier ist zwischen Durchlaufkühlung und Verdunstungskühlung beispielsweise in Kühltürmen zu unterscheiden. Bei der Durchlaufkühlung wird die abfließende Wassermenge erwärmt und eventuell durch Zusätze etwa gegen Algenbefall geringfügig verunreinigt. Wäre die Temperaturbelastung des Vorfluters zu hoch, kann die Verdunstungskühlung gewählt werden. Typisch hierfür sind bei großen thermischen Kraftwerken oder Industrieanlagen Kühltürme, in denen Wasser verdunstet, also an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Verdampfungswärme (vgl. Abb. 1) muss dabei aufgebracht werden und dient zur Kühlung.

Wichtig im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist die Feststellung, dass Wasser im Gegensatz etwa zu Brennstoffen oder zur elektrischen Energie im Allgemeinen nicht verbraucht wird, sondern vielfach nur verunreinigt oder thermisch belastet wird. Die Reinigung des Wassers kann aufwändig und damit teuer sein, jedoch geht aus globaler Sicht kein Wasser verloren. Die Natur reinigt Wasser durch Destillation (Verdunstung und Trocknung, vgl. Kap. 1.2), Tiefenfiltration (Grundwasser), Kristallisation (Eisbildung) sowie weitere physikalische, chemische und biologische Methoden. In der Technik sind diese und weitere Methoden zur Wasserreinigung in Gebrauch; Membranverfahren werden zunehmend genutzt, auch zur Meerwasserentsalzung mittels umgekehrter Osmose (Prinzip vgl. Abb. 2). Aus regionaler Sicht bzw. für einen begrenzten Bilanzraum gilt für einen bestimmten Zeitraum zwar auch der Massenerhaltungssatz für das Wasser,

$$N + Z - A - V - \Delta S = 0, \quad (1)$$

mit N = Masse des Niederschlags
 Z = Masse des Zuflusses aus Oberliegern ($Z = 0$, wenn der Bilanzraum ein Flusseinzugsgebiet ist)
 A = Masse des Abflusses
 V = Masse des verdunsteten Wassers
 ΔS = Masse der Speicheränderung (positiv bei Zunahme der gespeicherten Menge),

zu berücksichtigen ist jedoch, dass die verdunstete Wassermasse nicht mehr als Wasser im Bilanzraum verfügbar ist, während der Abfluss, bevor er den Bilanzraum verlässt, zuvor mehrfach genutzt und gereinigt werden kann. Man könnte daher die verdunstete Wassermenge als Wasserverbrauch bezeichnen, da diese Menge zum Zeitpunkt der Verdunstung nicht mehr für den Bilanzraum zur Verfügung steht. Da das verdunstete Wasser

irgendwann als Niederschlag zur Erdoberfläche zurückkommt, könnte je nach Größe des Bilanzraumes zumindest ein Teil dieser verdunsteten Wassermenge wieder der betrachteten Region zugeführt werden. Dieser Sekundär-Effekt wird im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Die (natürliche) Verdunstung setzt sich aus Evaporation (E) und Transpiration (T) zusammen und wird als Evapotranspiration

$$ET = E + T \quad (2)$$

bezeichnet. Evaporation ist die Verdunstung von feuchten Feststoff-Oberflächen wie dem Erdboden (Bodenevaporation), von durch Niederschlag befeuchteten Pflanzenoberflächen (Interzeption) und von weiteren Wasserflächen ohne biologisch-physiologische Prozesse. Transpiration ist die Verdunstung von Pflanzen durch biologisch-physiologische Vorgänge. Die Evaporation ausreichend nasser Feststoffoberflächen oder von Gewässeroberflächen hängt nur von den äußeren Bedingungen der Luft an den betrachteten Oberflächen wie Temperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit sowie von der zugeführten Strahlungsenergie ab. In der Bodenkunde wird dieser Verdunstungsbereich als potenzielle Evaporation bezeichnet, in der Trocknungstechnik spricht man von einem ersten Trocknungsabschnitt (vgl. Mersmann et al., 2005). Durch die benötigte Verdampfungswärme wird die Oberfläche gekühlt, was in vielen trocken-warmen Gebieten der Erde für Pflanzen lebensnotwendig ist. Kann die Feststoffoberfläche, beispielsweise die Bodenoberfläche, durch kapillaren Wassertransport aus dem Innern nicht mehr ausreichend nass gehalten werden, sinkt der Wasserspiegel von der Oberfläche in das Innere des Bodens. Die Verdunstungsgeschwindigkeit verringert sich dann, da der Vorgang zunehmend durch die Diffusion des Wasserdampfes an die Bodenoberfläche kontrolliert wird. Dieser Verdunstungsabschnitt wird in der Bodenkunde als reale Evaporation und in der Technik als zweiter Trocknungsabschnitt bezeichnet. Mit zunehmender Austrocknung der Feststoffoberfläche verringert sich die Evaporationsgeschwindigkeit und wird im Fall des Bodens hauptsächlich durch die Bodeneigenschaften bestimmt.

Die in Kapitel 1.2 genannte Verdunstung über der Landfläche der Erde von ca. $70.000 \text{ km}^3/\text{a}$ ist gleich der Evapotranspiration. Sie kann beispielsweise durch die Art der Landnutzung, durch die Pflanzenwahl und durch die Bodenbearbeitung beeinflusst werden. Die durch den Menschen verursachte Verdunstung in Kühltürmen ist gegenüber der gesamten verdunsteten Wassermenge vernachlässigbar klein.

Die besondere Bedeutung der Verdunstung gegenüber den anderen Wassernutzungsarten kommt auch durch folgende Überlegung zum Ausdruck: Wird in einer Region (Bilanzraum) Wasser zur Herstellung eines nicht landwirtschaftlich erzeugten Produkts oder zur Erbringung von Dienstleistungen genutzt, so steht dieses Wasser nach ausreichender Reinigung für den weiteren Gebrauch zur Verfügung und gelangt am Ende in den Abfluss des Bilanzraumes. Zur Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte wird dagegen Wasser überwiegend für die Evapotranspiration benötigt. Dieses Wasser verdunstet also und steht in der betrachteten Region nicht mehr zur Verfügung. Bei einer großflächigen Bewässerung trockener Böden steigt die Verdunstung V und verringert nach Gleichung (1) den Abfluss A , sofern N und Z konstant bleiben und ΔS im langjährigen Mittel verschwindet (Nachhaltigkeit). Insgesamt gesehen kann also eine großräumige Nutzung arider Gebiete für die Landwirtschaft durch Einsatz zusätzlicher Bewässerung den globalen Wasserkreislauf beeinflussen.

Eine ausführliche Darstellung der Wasserbilanzen speziell für die Region Berlin-Brandenburg hat Grünwald (2010) zusammengestellt.

Über die Angabe der globalen Wassermenge, die für die menschliche Nutzung verfügbar ist, bestehen in der Literatur unterschiedliche Schätzwerte. Nach einer Recherche von Lehn und Parodi (2009) werden in der Fachliteratur vielfach $40.000 \text{ km}^3/\text{a}$ als erneuerbare jährliche Wasserressource angesehen (vgl. Gleick, 2000; Lemke, 2002; Lozan et al. 2005). Bezogen auf die heutige Erdbevölkerung von 6,5 Milliarden Menschen ergeben sich rund 6.000 m^3 nutzbares Wasser pro Einwohner und Jahr ($6.000 \text{ m}^3/(\text{Einw} \cdot \text{a})$). Nach Schätzungen von Zehnder (2002) stehen global lediglich 9.000 bis $12.000 \text{ km}^3/\text{a}$ Wasser für die Trinkwassergewinnung, die Landwirtschaft oder als Brauchwasser für die Industrie zur Verfügung. Auf die Erdbevölkerung bezogen sind dies rund $1.500 \text{ m}^3/(\text{Einw} \cdot \text{a})$. Nach Falkenmark (1989) liegt dieser Wert an der Grenze zur Wasserknappheit. Bei der Abschätzung von Zehnder (2002) ist das über der Landfläche verdunstete Wasser als nicht nutzbarer Anteil abgezogen worden. Die Evapotranspiration ist jedoch für die Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte zu berücksichtigen, sodass die Angaben von Zehnder zu höheren Werten zu korrigieren sind. Auf diese Problematik haben bereits Lehn und Parodi (2009) hingewiesen und schätzen, dass im langjährigen Mittel rund 100.000 km^3 Wasser pro Jahr als erneuerbare Ressource und damit zur menschlichen Nutzung verfügbar sind. Die Schätzwerte aus Lite-

aturdaten für die globale Menge der jährlich für den Menschen nachhaltig nutzbare Ressource Wasser liegen also zwischen 10.000 und $100.000 \text{ km}^3/\text{a}$ (pro Kopf: 1.500 bis $15.000 \text{ m}^3/\text{a} \approx 4.000$ bis 40.000 Liter/Tag) und schwanken damit um den Faktor 10. Nimmt man mangels gesicherten Daten einen Mittelwert zwischen den beiden Grenzwerten an, so stünden global rund 8.000 m^3 pro Jahr bzw. 20.000 Liter pro Tag nutzbares Wasser pro Kopf der Erdbevölkerung als erneuerbare Ressource zur Verfügung. Damit gäbe es aus globaler Perspektive derzeit und in den nächsten Dekaden keine Wasserknappheit (vgl. Kap. 3.2). Weitere Untersuchungen zur Verringerung der genannten Schwankungsbreite sind jedoch nötig, um auf einer besser gesicherten Datenbasis weiterführende Berechnungen erstellen zu können.

Die globale Wasserverfügbarkeit ist jedoch kein ausreichendes Kriterium, um die Versorgung der Menschen mit Wasser bewerten zu können. Wichtiger ist die regionale Wasserverfügbarkeit. Es gibt Regionen mit Wasserüberschuss, Gebiete mit guter bis ausreichender Wasserversorgung sowie Regionen mit Wasserknappheit (1.700 bis $1.000 \text{ m}^3/(\text{Einw} \cdot \text{a})$), mit erheblichem Wassermangel (< 1.000 bis $500 \text{ m}^3/(\text{Einw} \cdot \text{a})$) und mit extremem Wassermangel ($< 500 \text{ m}^3/(\text{Einw} \cdot \text{a})$) (Falkenmark und Widstrand, 1992). Schließlich ist noch die zeitliche Wasserverfügbarkeit zu berücksichtigen. Eine Trockenheit während der Vegetationsperiode beeinflusst den Flächenertrag in der Landwirtschaft und kann durch eine zusätzliche Bewässerung ausgeglichen werden. Da Wasser nach dem heutigen Stand der Technik nicht in den erforderlich großen Mengen und über große Entfernungen hinreichend effizient transportiert werden kann, scheidet ein Ausgleich über direkten Wassertransport meist aus, sofern kein natürliches Gefälle für den Transport genutzt werden kann. Die Wasserversorgung von Staaten durch Flüsse, deren Hauptwasserquellen auch außerhalb des eigenen Einflussgebietes liegen können, ist ein Beispiel für den direkten Wassertransport. Ein Transport von Wasser zwischen weit entfernten wasserreichen und wasserarmen Regionen beispielsweise auf dem Schiffswege, um landwirtschaftliche Flächen bewässern zu können, scheidet dagegen nach heutiger Einschätzung aus wirtschaftlichen Gründen aus. Regionen, die beispielsweise infolge einer Wasserknappheit keine ausreichende eigene Landwirtschaft betreiben können, müssen daher Rohstoffe für Lebensmitteln und Tierfutter aus anderen Ländern beziehen. Da Pflanzen bis zur Ernte große Wassermengen erfordern, wird für die Nahrungsmittelproduktion der überwiegende Teil des vom Menschen genutzten Wassers benötigt. Wie noch zu erläutern



ist, sind zur Produktion von 1 kg Lebensmittel in der Größenordnung 1.000 bis 10.000 kg Wasser erforderlich. Dem Transport von 1 kg Lebensmittel steht also der Transport der 1.000-10.000 fache Wassermasse in eine Trockenregion gegenüber, um dort die Lebensmittelrohstoffe selbst erzeugen zu können. Diese Überlegungen liefern die Grundlage für das Konzept des Virtuellen Wassers.

2. DAS GEDANKLICHE KONZEPT DES VIRTUELLEN WASSERS

2.1 DEFINITIONEN

Das zur Erzeugung eines Produkts oder zur Erbringung einer Dienstleistung benötigte Wasser wird als Virtuelles Wasser bezeichnet. Das in einem Produkt vorhandene, reale Wasser ist darin enthalten, zumal es in der Regel zur Herstellung des Produkts benötigt wird. Im hier gemeinten Sinne wird auch elektrische Energie als Produkt angesehen. *(Anmerkung: Diese Vereinbarung ist zwar auch aus juristischer Sicht nicht korrekt, aber hier zweckmäßig. In der Literatur wird nach Kenntnis des Autors die Frage, wie elektrische Energie bei der Definition des Virtuellen Wassers zu berücksichtigen ist, nicht ausreichend behandelt. Die Erzeugung elektrischer Energie kann erhebliche Mengen Wasser erfordern. Ob und inwieweit der Import und Export von elektrischer Strom bei den Kapiteln 2.2 und 3.2 genannten Daten zutreffend berücksichtigt wurde, ist der dort angegebenen Literatur nicht in ausreichend klarer Weise zu entnehmen.)*

Das gedankliche Konzept des Virtuellen Wassers (virtual water) wurde 1994 von Allen in London eingeführt (Allen, 1994; World Water Council, 2004). Es beruht auf Analysen israelischer Wasserexperten, die festgestellt hatten, dass es für ihr wasserarmes Land sinnvoller ist, wasserintensive Agrarprodukte zu importieren als selbst anzubauen und sogar zu exportieren (World Water Council, 2004). Der Import bezieht sich hauptsächlich auf Massenprodukte wie Getreide; hochwertige und damit teure Agrarrohstoffe können im eigenen Land erzeugt werden, wenn die anteiligen Wasserkosten hinreichend klein sind.

Der Hydrologe Allen hat versucht, mit dem Begriff des Virtuellen Wassers, das ursprünglich von ihm als Metapher entwickelt wurde, die tatsächliche Menge des vom Menschen genutzten Wassers zu verdeutlichen. Ferner können mit Hilfe des Konzepts Virtuelle Wasserströme verfolgt werden, da beim Handel mit Gütern, zu deren Herstellung große Wassermengen benötigt werden, dieses Wasser als virtuell transferiert betrachtet werden kann. Man bezeichnet diesen nicht realen Transfer als Virtuellen Wasserhandel (Hoekstra, 2003a, World Water Council, 2004). Wird etwa ein wasserintensives Agrarprodukt exportiert, so fehlt dieser Region das für die Evapotranspiration benötigte Wasser, während die importierende Region diese Wassermenge spart. Nähere Ausführungen hierzu enthält das Kapitel 4.1.

Der Begriff „virtuell“ wird umgangssprachlich oft als „fiktiv“ oder als Gegenteil von „real“ missverstanden. „Virtuell“ ist im hier gebrauchten Sinne eine gedachte Eigenschaft, die zwar nicht physisch, aber in ihrer Wirkung vorhanden ist. Der vor 1994 ge-

prägte Begriff „*eingebettetes Wasser*“ („embedded water“) hat sich nicht durchgesetzt. Heute ist „Virtuelles Wasser“, mitunter auch als *verstecktes Wasser* bezeichnet, ein gebräuchlicher Begriff nicht nur in der wissenschaftlichen Fachliteratur. In den Massenmedien wie Print- und elektronischen Medien wird über Virtuelles Wasser berichtet und Informationsmaterial auch für Unterrichtszwecke verteilt (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, 2009).

2.2 ANWENDUNG DES KONZEPTS

Das Konzept des Virtuellen Wassers klingt einfach, ist jedoch in der praktischen Ausführung schwierig. Zunächst ist zu unterscheiden zwischen Dienstleistungen und Produkten. Bei Dienstleistungen ist offen, in welcher Weise der Wasserbedarf einschließlich des benötigten Virtuellen Wassers eines Menschen, der die Dienstleistung erbringt, zu berücksichtigen ist. Entsprechendes gilt für Produkte, die von Dienstleistenden verwendet werden. Im Fall von Produkten ist die Art der Wassernutzung zu beachten. Wird Wasser durch die Nutzung lediglich verunreinigt, lässt es sich durch eine Reinigung wieder verwenden. Durch geeignete Kreislaufführung mit integrierter Wasseraufbereitung kann der Wasserbedarf an einem Produktionsstandort und damit auch pro Produkt erheblich verringert werden. Wasser, das in die Atmosphäre verdunstet, ist dagegen für den betrachteten Bilanzraum verloren und kann regional als verbraucht angesehen werden (vgl. Kapitel 1.3). Der überwiegende Wasserbedarf, der bei der Fertigung beispielsweise von Industrieprodukten, im Haushalt oder bei der Be- und Verarbeitung von Rohstoffen zu Nahrungsmitteln benötigt wird, ist daher anders zu bewerten als die für die Evapotranspiration benötigte Wassermenge zur Erzeugung von Agrarrohstoffen. In der Regel wird der überwiegende Anteil des von Industrie, Gewerbe oder Haushalt genutzten Wassers verschmutzt und nur ein geringer Anteil durch Verdunstung, Verdampfung oder Sublimation in die Atmosphäre gegeben. Dieser Gesichtspunkt wird bisher nicht in ausreichender Weise im Rahmen des Konzepts des Virtuellen Wassers diskutiert.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus der Frage, wie die Wasserbeschaffenheit zu berücksichtigen ist. Im ursprünglichen Konzept des Virtuellen Wassers blieb die Wasserbeschaffenheit unberücksichtigt. Inzwischen wird versucht, durch die Einteilung in „Grünes“, „Blaues“ und „Graues“ Wasser, die in Kapitel 3.3 erläutert wird, zumindest ansatzweise Herkunft und teilweise Beschaffenheit des Wassers zu berücksichtigen (Mekonnen

und Hoekstra, 2010a, 2010b und 2010c). Da beispielsweise Blaues Wasser, das aus dem Grund- und Oberflächenwasser besteht, wegen unterschiedlicher Beschaffenheit an verschiedenen Standorten nicht in gleicher Weise für die Erzeugung von Lebensmittel-Rohprodukten geeignet ist, müsste die Wasserbeschaffenheit in das Konzept des Virtuellen Wassers aufgenommen werden. Eine eventuell nötige Wasserreinigung und die damit verbundenen Kosten sind nicht Gegenstand des jetzigen Konzepts. Bisher fehlt ein geeigneter Ansatz, wie die Wasserbeschaffenheit für die Bewertung des Virtuellen Wassers in zufriedenstellender Weise berücksichtigt werden kann.

Zur genaueren Beschreibung des Virtuellen Wassers wurden zwei unterschiedliche Definitionen vorgeschlagen (Hoekstra, 2003b). Bei der ersten Definition wird als Virtuelles Wasser dasjenige festgelegt, das tatsächlich am Produktionsort für die Herstellung des betrachteten Produkts in bestimmter Menge benötigt wird. Virtuelles Wasser nach der zweiten Definition ist dasjenige, das man für die Herstellung des gleichen Produkts in gleicher Menge an demjenigen Ort benötigen würde, an dem das Produkt gebraucht wird. Die erste Definition beschreibt die Sicht des Herstellers, die zweite diejenige des Verbrauchers. In dieser Arbeit wird von der ersten Definition ausgegangen, sofern nicht besonders auf die zweite Definition hingewiesen wird.

Die Menge des Wassers zur Produktion sowohl von Agrargütern (Hoekstra, 2008) als auch von Industriegütern (Dehler, 2010) kann erheblich vom Ort der Herstellung abhängen. Ist beispielsweise die Menge des Wassers zur Herstellung eines bestimmten Produkts im Land A dreimal so groß wie im Land B zur Herstellung des gleichen Produkts in gleicher Menge, so würde beim Export gleicher Mengen dieses Produkts von A nach B die dreifache virtuelle Wassermenge transferiert werden im Vergleich zum Export von B nach A. Beim Produkttransfer von A nach B verliert also A die dreifache Menge an Virtuellem Wasser als B einspart, wenn es die gleiche Menge des gleichen Produkts im eigenen Land erzeugen würde. Auf der Basis umfangreicher Daten haben Hoekstra und Chapagain (2008) in einem Standardwerk die Verknüpfungen zwischen Wassernutzung und dem internationalen Handel dargestellt.

Produkte lassen sich nicht an allen Standorten sinnvoll erzeugen. So gedeihen Reis- und Kaffeepflanzen nicht im Freiland in Deutschland. Um das Virtuelle Wasser von Agrarprodukten aus unterschiedlichen Standorten miteinander vergleichen zu können, hat Renault (2003) vorgeschlagen, ähnliche Erzeugnisse

mit gleichem ernährungsphysiologischem Wert heranzuziehen. Mit einem derartigen Ansatz lässt sich sogar das Virtuelle Wasser von Meeresfrüchten schätzen, die in Salzwasser leben und daher kein (Süß)wasser benötigen. Da mit diesem Ansatz 8 % des globalen Virtuellen Wassers Meeresfrüchten zugeordnet werden kann (Renault, 2003), ist dieser Anteil nicht vernachlässigbar klein. Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Gewinnung von Biomasse aus Meerwasser eine Option sein könnte, um einer zukünftigen Wasserknappheit begegnen zu können. Algen für Futtermittel, als Energieträger oder sogar für die menschliche Ernährung sind denkbar und werden erforscht (Posten und Schaub, 2009).

Um das für die Herstellung von Produkten erforderliche Wasser für Vergleiche heranzuziehen zu können, ist es meist üblich, das Volumen des benötigten Wassers auf die Masse des jeweiligen Produkts zu beziehen. Wenn pro kg Produkt 1000 Liter Wasser benötigt werden, so gilt für das bezogene Volumen v des Virtuellen Wassers:

$$v = 1000 \text{ Liter Wasser}/(\text{kg Produkt}) = 1000 \text{ Liter}/\text{kg} = 1 \text{ m}^3/\text{kg} = 1000 \text{ m}^3/\text{t}$$

Das Produkt kann ein Vor- (z. B. Kaffeebohne gleich nach der Ernte), Zwischen- (geröstete Kaffeebohne) oder Endprodukt (trinkfertiger Kaffee) sein. Eine genaue Produktbezeichnung ist nötig, da das bezogene Volumen v – wie Literaturdaten für das obige Beispiel lehnen (Hoekstra, 2008) – um mehr als den Faktor 10 schwanken kann. Ungenaue Produktbezeichnungen sind die Ursache für viele nicht nachvollziehbare Angaben zum Virtuellen Wasser. Das auf die Produktmasse bezogene Virtuelle Wasservolumen v wird häufig als Virtueller Wassergehalt eines Produkts bezeichnet. Ist der Massenanteil der gesamten Pflanze groß gegenüber dem geernteten Wertstoff wie bei Kakao-, Kaffee- und Baumwollpflanzen, ergeben sich hohe Werte des Virtuellen Wassers pro Masse des Erntegutes, also hohe virtuelle Wassergehalte.

Mitunter wird das Virtuelle Wasser auch auf andere Produktmengen wie auf eine Tasse Kaffee oder ein Baumwoll-T-Shirt bezogen, um den hohen Wasserbedarf für die Herstellung zu veranschaulichen. Für allgemeine Abschätzungen kann das Virtuelle Wasser auch auf den Preis des Produkts bezogen werden. Wie bereits genannt wurde, ist bei Lebensmitteln auch ein Bezug auf den ernährungsphysiologischen Wert bzw. den Energiegehalt möglich (Renault 2003). Bei elektrischer Energie sollte

das Virtuelle Wasser zweckmäßigerweise auf eine Energieeinheit wie kJ oder kWh bezogen werden, auch wenn ein Massenbezug über die Erdöl- oder Steinkohleeinheit möglich wäre.

Das Konzept des Virtuellen Wassers ähnelt einem Teilaspekt der Ökobilanz, mit der die Wirkungen von Produkten auf die Umwelt während des gesamten Lebenswegs analysiert werden (LCA – Life Cycle Assessment). Die Methodik zur Erstellung von Ökobilanzen (LCA) ist inzwischen weit entwickelt (ISO-Norm 14040) und wesentlich umfassender als das Konzept des Virtuellen Wassers, beispielsweise auch zur Bewertung einer Nachhaltigkeit (Finke, 2008). Nach dem Wissen des Autors wurde das Konzept des Virtuellen Wassers noch nicht in Richtung LCA erweitert (vgl. Hoekstra, 2003b).

Das für Pflanzen in der Vegetationsphase benötigte Wasser ist auch aus der Bodenkunde bekannt (vgl. Blume et al., 2010). Dort wird die Verknüpfung von Wasserverbrauch durch Evapotranspiration ET zum Pflanzenertrag durch den Evapotranspirations-Koeffizienten ETK ausgedrückt, der den Wasserverbrauch infolge einer Verdunstung (ET) bezogen auf die erzeugte Pflanzentrockenmasse während der gesamten Wachstumszeit beschreibt.

$ETK = ET / \text{Trockenmasse} = \text{kg Wasser/kg Trockenmasse}$

Bei ausreichender Wasserverfügbarkeit liegen die gerundeten Mittelwerte von ETK für einige einheimische Kulturpflanzen zwischen 200 (Kartoffeln), 350 (Winterweizen) und 450 (Buschbohnen). Die Werte stammen aus Feldversuchen aus dem Thüringer Becken (Roth et al., 2005). ETK hängt stark von der gesamten Wachstumsdauer der jeweiligen Kulturpflanzen ab. Der Bezug auf die Trockenmasse des Produkts und die Wahl eines dimensionslosen Faktors ist zweckmäßig, jedoch in der Fachliteratur über Virtuelles Wasser unüblich.

Im Folgenden wird schwerpunktmäßig das Virtuelle Wasser von Agrarrohstoffen behandelt. Diese Vereinfachung ist vertretbar, da ca. 70 % (Hoekstra und Chapagain, 2008; Wefer, 2010; UBA, 2011), also der überwiegende Teil des vom Menschen genutzten Wassers, zur landwirtschaftlichen Erzeugung von Rohprodukten hauptsächlich für die Nahrungsmittelproduktion benötigt wird.

Bei Nutzpflanzen wird das Virtuelle Wasser hauptsächlich durch die Verdunstung während der Zeitspanne zwischen Aussaat und Ernte bestimmt. Bei Pflanzen wie Reis wird die Zeit der Feldvor-

bereitung unmittelbar vor der Aussaat bzw. Pflanzung noch hinzugezählt (Chapagain, Hoekstra, 2010). Vor allem entscheidet die Evapotranspiration über die Menge des Virtuellen Wassers im Endprodukt. Das für die Be- und Verarbeitung nötige Prozesswasser liegt in modernen Betrieben der Ernährungsindustrie im Allgemeinen nur im Bereich weniger Prozente im Vergleich zur produktbezogenen Wassermenge, welche für die Evapotranspiration erforderlich ist (Brabeck-Letmathe, 2008). Die Evapotranspiration hängt hauptsächlich von der Art der Pflanze und ihrem Wasserbedarf, von der Wasserverfügbarkeit, von den meteorologischen Daten des jeweiligen Standortes und von der Art der Landbewirtschaftung ab. Wird künstlich bewässert, sind die Art und Effizienz der Bewässerung sowie das Wassermanagement entscheidende Faktoren für die Menge des Virtuellen Wasser pro Ernteprodukt. Die Menge des verdunsteten Wassers über bewachsenen Landflächen kann mit Hilfe von empirischen Gleichungen ermittelt werden (vgl. Dietrich und Schöniger, 2008). In der Regel erhält man Schätzwerte, die erheblichen Unsicherheiten unterliegen. Aus dem flächenbezogenen Wasserbedarf der betrachteten Nutzpflanzen ($\text{m}^3 \text{ Wasser/ha}$), bezogen auf den Ertrag einer Agrarfläche (t Produkt/ha), erhält man den Virtuellen Wassergehalt des Produkts. Man erkennt, dass der Virtuelle Wassergehalt mit steigendem Ertrag abnimmt. Beispielsweise hat sich die weltweite Getreideproduktion im Zeitraum von 1960 bis 2005 bei etwa gleich bleibender Anbaufläche infolge einer jährlichen Produktionssteigerung von ca. 3 % insgesamt verdreifacht (vgl. Fuchs, 2009). Bei annähernd gleicher Gesamt-Evapotranspiration hat sich also der Virtuelle Wassergehalt in der genannten Zeitspanne insgesamt um den Faktor drei verringert.

Das Produkt, auf das das Virtuelle Wasser jeweils bezogen wird, ist genau festzulegen. Wird das geerntete Material unterschiedlich genutzt, sollte das Virtuelle Wasser den jeweiligen Teilmengen anteilig zugeordnet werden. So wären es bei Getreide einerseits die Körner oder das daraus produzierte Mehl für die menschliche Ernährung, andererseits Stroh und Spelzen beispielsweise zur Gewinnung von Energie. Die einzelnen Teilmengen können massen- oder wertmäßig zugeordnet werden. Die damit zusammenhängende Problematik wird im Schrifttum nicht immer ausreichend berücksichtigt, sie ist jedoch von Bedeutung, da je nach Zuordnung der virtuelle Wassergehalt um mehr als den Faktor 2 schwanken kann.

Der Virtuelle Wassergehalt von tierischen Produkten ist in den meisten Fällen wesentlich größer als derjenige von pflanzlichen

Gütern. Tiere benötigen während der Zeit Ihres Lebens Futter, Tränkwasser und bei Stallhaltung weiteres Wasser für Reinigungszwecke. Das überwiegend pflanzliche Futter benötigt zur landwirtschaftlichen Erzeugung große Wassermengen, die als Virtuelles Wasser den tierischen Produkten zugeschlagen werden. Den vielfältigen tierischen Produkten wie Fleisch, Wurst, Eier, Milch und Käse wird anteilig das insgesamt vom Tier benötigte Virtuelle und reale Wasser sowie das zur Verarbeitung gebrauchte Wasser zugeordnet. Die anteilige Zuordnung kann über den Marktwert oder auch massenmäßig vorgenommen werden. Meist wird über den Marktwert zugeordnet. Als erste Orientierung ergibt sich aus Literaturwerten (Mekonnen und Hoekstra, 2010b) ein Virtueller Wassergehalt von verzehrsgerichten tierischen Produkten im Bereich von 3000 bis 15.000 Liter/(kg Produkt). Dagegen liegt der Virtuelle Wassergehalt gebrauchsfähiger pflanzlicher Produkte in der Regel im Bereich von 1000 bis 3000 Liter/(kg Produkt). Ausnahmen bilden Kaffee- und Kakaobohnen sowie Baumwolle mit wesentlich höheren Werten des Virtuellen Wassergehalts. Beispiele für einige ausgewählte Produkte zeigen die Tabellen 1 und 2.

Für verzehrsfertige Lebensmittel gelten folgende Anhaltswerte (Brabeck-Letmathe, 2008):

Ca. 10 Liter Wasser für 1 kcal (4,2 kJ) Fleisch,
ca. 1 Liter Wasser für 1 kcal pflanzliche Nahrung.

Dies ergibt ca. 3000 Liter Wasser pro erwachsener Person und Tag für Lebensmittel im weltweiten Durchschnitt. (Die empfohlene Energiezufuhr pro Tag und erwachsener Person liegt bei ca. 2.500 kcal \approx 10.000 kJ).

Die vielfältigen Parameter, Vereinfachungen und unterschiedliche Vereinbarungen können die geschätzte Menge des Virtuellen Wassergehalts erheblich beeinflussen. Angaben über Vertrauensbereiche der publizierten Schätzwerte fehlen im Allgemeinen. Da sich der Wert des ermittelten Virtuellen Wassers aus mehreren Schätzwerten zusammensetzt, wäre zu fragen, ob eventuell eine modifizierte Fermi-Lösung (vgl. Peleg et al., 2007) helfen könnte, die Aussagekraft der Daten zu verbessern. Die Fermi-Lösung ist die quantitative Abschätzung eines Wertes, der sich aus mehreren Teilschätzwerten zusammensetzt und mit möglichst einfachen Rechenmethoden ermittelt wird. Die Genauigkeit der Fermi-Lösung beruht auf der Erfahrung, dass teils zu hohe und teils zu tiefe Teilschätzwerte angenommen werden und dadurch der Fehler des gesuchten Wertes gering bleibt. Da es sich vielfach um Verteilungen handelt, ist der Umgang mit Berechnungen von verteilten Größen meist erforderlich.

Die mitunter nicht erklärbaren großen Schwankungen bei Abschätzungen des Virtuellen Wassergehalts wurden kürzlich in der Fachliteratur diskutiert (Lischeid, 2010).

Tabelle 1: Wasserbedarf (Virtuelles Wasser) für ausgewählte Produkte (Hoekstra und Chapagain, 2007).

PRODUKT	VIRTUELLES WASSER IN Liter	VIRTUELLER WASSERGEHALT IN Liter/kg PRODUKT
1 Tasse Tee (250 ml)	35	140
1 Glas Bier (250 ml)	75	300
1 Glas Wein (250 ml)	240	1.000
1 Tasse Kaffee (125 ml)	140	1.100
1 Scheibe Brot (30 g)	40	1.300
1 Scheibe Brot mit 10 g Käse	90	2.300
1 Ei (40 g)	135	3.400
1 „Hamburger“ (150 g)	2.400	16.000
1 Baumwoll-T-Shirt (200 g)	2.000	8.000
1 Mikrochip (2 g)	32	16.000

Tabelle 2: Virtueller Wassergehalt für ausgewählte Lebensmittel (Hoekstra und Chapagain, 2007).

PRODUKT	VIRTUELLER WASSERGEHALT IN Liter/kg PRODUKT	
	FÜR VERSCHIEDENE LÄNDER	WELTDURCHSCHNITT
Rohrzucker	100 – 200	170
Mais	400 – 1.900	900
Milch (Kuh)	650 – 2.400	1.000
Weizen	620 – 2.400	1.300
Sojabohnen	1.100 – 4.100	1.800
Reis	1.000 – 4.600	2.900
Hähnchenfleisch	2.200 – 7.700	3.900
Schweinefleisch	2.200 – 7.000	4.900
Rindfleisch	11.000 – 21.200	15.500
Kaffeebohnen (geröstet)	5.800 – 33.500	20.700

Anmerkung: Der hohe Virtuelle Wassergehalt v von gerösteten Kaffeebohnen entsteht erst durch die Verarbeitung. Für die Kaffeefrucht (Kaffeekirsche) nach der Ernte ist $v \approx 2.800$ Liter/kg (Weltdurchschnitt, Hoekstra und Chapagain, 2008). Da nur die Samen (Bohnen) der Kaffeekirsche genutzt werden und das Fruchtfleisch verworfen wird, verringert sich die Bezugsmasse, dadurch erhöht sich entsprechend der Virtuelle Wassergehalt, der durch die Trocknung während der Röstung weiter vergrößert wird. Das während der Aufbereitung benötigte Prozesswasser ist selbst bei einer Nassaufbereitung (ca. 10 Liter Wasser/kg Kaffeekirsche) für den Virtuellen Wassergehalt gerösteter Kaffeebohnen vernachlässigbar klein. Der mitunter zu lesende Hinweis, dass die Kaffee-Verarbeitung große Wassermengen erfordert, ist daher nicht zutreffend.

3. DAS KONZEPT DES WASSER-FUSSABDRUCKS

3.1 DEFINITIONEN

Der Wasser-Fußabdruck (water footprint) ist das gesamte Wasservolumen, das pro Zeiteinheit für eine Person oder für einen bestimmten Kreis von Menschen benötigt wird. Es enthält sowohl das direkt benötigte Wasservolumen als auch diejenige indirekte (virtuelle) Wassermenge, die zur Herstellung von Gütern und zur Erbringung von Dienstleistungen zur Nutzung für die betrachtete Person oder den Personenkreis erforderlich ist. Meist wird der Wasser-Fußabdruck auf den Zeitraum eines Jahres bezogen. Es ist auch üblich, den Wasser-Fußabdruck auf Regionen wie Städte, Staaten und Länder oder auf Unternehmen zu beziehen, in denen Güter hergestellt oder Dienstleistungen erbracht werden.

Der Wasser-Fußabdruck kann auf unterschiedliche Arten ermittelt werden. Einerseits lässt er sich aus dem gesamten Volumen des Virtuellen Wassers aller in einer Region beanspruchten Waren und Dienstleistungen abschätzen. Andererseits kann er aus der Menge aller in der betrachteten Region beanspruchten Wasserressourcen zuzüglich des von der Region importierten und abzüglich des dort exportierten Virtuellen Wassers ermittelt werden. Die zweite Methode ist die gebräuchlichste. Eine inzwischen umfangreiche Datensammlung wurde vom „UNESCO-IHE Institute for Water Education“ in Delft sowie von den niederländischen Universitäten Twente in Enschede und Delft erarbeitet (vgl. Hoekstra und Chapagain, 2008). Seit 2008 existiert das „Water Footprint Network“ (WFN, 2008), über das eine umfangreiche Literatur über Virtuelles Wasser und den Wasser-Fußabdruck abgerufen werden kann.

Eine für den weltweiten Handel nützliche Größe ist der Wasser-Fußabdruck von Nationen. Beispielsweise wird der Wasser-Fußabdruck Deutschlands mit $125 \text{ km}^3 \text{ Wasser/a} \approx 4.000 \text{ Liter Wasser}/(\text{Einwohner} \cdot \text{Tag})$ angegeben (Hoekstra, 2008). Andere Schätzungen gehen von $160 \text{ km}^3 \text{ Wasser/a} \approx 5.000 \text{ Liter}/(\text{Einwohner} \cdot \text{Tag})$ aus (Sonnenberg et al. 2009). Zu beachten ist, dass sich je nach Definition des Wasser-Fußabdrucks unterschiedliche Dimensionen ergeben wie

$\text{m}^3 \text{ Wasser}/(\text{Person} \cdot \text{a})$,
 $\text{m}^3 \text{ Wasser}/(\text{Unternehmen} \cdot \text{a})$,
 $\text{m}^3 \text{ Wasser}/(\text{Region} \cdot \text{a})$ oder
 $\text{m}^3 \text{ Wasser}/(\text{Nation} \cdot \text{a})$.

In der neueren Literatur hat der Urheber des Wasser-Fußabdrucks vorgeschlagen, das Konzept auch auf Produkte und Dienstleistungen anzuwenden (Hoekstra, 2008). Der Wasser-Fußabdruck eines Produkts ist dann dasjenige Wasservolumen, das zur Herstellung einer bestimmten Masse dieses Produkts am Ort der tatsächlichen Herstellung benötigt wird. Üblicherweise wird der so definierte Wasser-Fußabdruck in der Dimension $\text{m}^3 \text{ Wasser}/(\text{kg Produkt})$ angegeben. Wie Hoekstra bemerkt, stimmt diese Definition mit der Definition des virtuellen Wassergehalts überein, jedoch wird stets auf den Ort der Herstellung bezogen, um einen regionalen Bezug zu ermöglichen. Entsprechendes gilt für Dienstleistungen.

3.2 ANWENDUNG DES KONZEPTS

Das Konzept des Wasser-Fußabdrucks stammt von Hoekstra (Hoekstra und Hung 2002). Es ist eine Erweiterung des Konzepts des Virtuellen Wassers und wurde in Anlehnung an den ökologischen Fußabdruck (vgl. Wackernagel und Rees, 1996) und den ökologischen Rucksack (Schmidt-Bleek, 1993) entwickelt. Es soll als Indikator für die direkte und indirekte Nutzung von Wasser durch Verbraucher und Produzenten dienen. Der Wasser-Fußabdruck gibt jedoch nicht nur die vom Menschen benutzten Wassermengen an, sondern soll auch verdeutlichen, an welchem Ort bzw. in welcher Region das Wasser für Produkte und Dienstleistungen zur Verfügung stehen muss und wo es vom Konsumenten benötigt wird (Hoekstra, 2008). Das folgende Beispiel dient zur Erläuterung: Ein durchschnittlicher Einwohner des Landes A möge pro Jahr 100 kg Lebensmittel aus dem Land B benötigen, zu deren Erzeugung dort 200.000 Liter Wasser erforderlich sind. Damit hinterlässt dieser Konsument durch den Verbrauch dieses Anteils seiner Lebensmittel, die also importiert werden, jährlich einen Wasser-Fußabdruck von 200.000 Liter Wasser im Land B.

Der globale Wasser-Fußabdruck für landwirtschaftliche Erzeugnisse liegt bei $7.500 \text{ km}^3/\text{a}$, dies ergibt pro Kopf der Weltbevölkerung rund $1.200 \text{ m}^3 \text{ Wasser/a} (\approx 3.300 \text{ Liter/Tag})$. Der jährliche Wasser-Fußabdruck pro Kopf schwankt zwischen 700 m^3 (China) und 2500 m^3 (USA). Die Daten wurden für den Zeitraum von 1997 bis 2001 ermittelt (Hoekstra und Chapagain, 2007) und stimmen mit neueren Daten ($7.400 \text{ km}^3/\text{a}$) für den Erhebungszeitraum 1996 bis 2005 annähernd überein (Mekonnen und Hoekstra, 2010a). Für den früheren Erhebungszeitraum 1971 bis 2000 wurde der globale Wasser-Fußabdruck für landwirtschaftliche Erzeugnisse auf der Basis einer Modellrechnung

(Rost et al., 2008) zu 8.500 km³/a geschätzt (vgl. Kapitel 4.1). Der oben genannte globale Mittelwert (3.300 Liter/Tag und Person) ist unter Berücksichtigung der großen Schwankungen in guter Übereinstimmung mit dem in Kapitel 2.2 genannten Schätzwert (3000 Liter/Tag und Person). Bezieht man den globalen Wasser-Fußabdruck von 7.500 km³/a auf die gesamte Festlandoberfläche der Erde (ca. 1,5 · 10⁸ km²), so erhält man den Wert 50 mm Wasser/a, der klein ist gegenüber der globalen Niederschlagsmenge von 750 mm/a auf das Festland der Erde (vgl. Kap. 1.2).

Geht man davon aus, dass landwirtschaftliche Ernteprodukte ca. 70 % des gesamten globalen Wasser-Fußabdrucks ausmachen (vgl. Kap. 2.2), so erhält man für den gesamten globalen Wasser-Fußabdruck einen Wert von rund 10.500 km³/a (pro Kopf und pro Tag 4.600 Liter Wasser), bezogen auf die gesamte Festlandoberfläche ergeben sich 70 mm Wasser/a, also weniger als 10 % der globalen Niederschlagsmenge auf das Festland der Erde.

Um eine Vorstellung entwickeln zu können, woher das in einem Land oder einer Region genutzte Wasser stammt, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, zwischen einem internen und einem externen Wasser-Fußabdruck zu unterscheiden. Der interne Wasser-Fußabdruck ist dasjenige zeitbezogene Wasservolumen, das im betrachteten Land für die Herstellung von Gütern und zur Erbringung von Dienstleistungen sowie für die häusliche Nutzung in derselben Zeit benötigt wird. Der externe Wasser-Fußabdruck bezieht sich auf das Virtuelle Wasser, das über importierte Güter oder Dienstleistungen während derselben Zeit in das betrachtete Land gelangt. Als Beispiel zeigt Tabelle 3 den internen, externen und gesamten Wasser-Fußabdruck der Bundesrepublik Deutschland. Über die Genauigkeit der Daten gibt es in der Literatur keine ausreichend zuverlässigen Angaben. Untersuchungen von Dehler (2010) über virtuelle Wasserströme von Industrieprodukten in Deutschland zeigen Abweichungen von über 30 % gegenüber den hier zitierten Daten für den Bereich der Industrieprodukte. Dies kann als Anhaltswert für die Schwankungsbreite der Schätzwerte dienen.

Tabelle 3: Interner, externer und gesamter jährlicher Wasser-Fußabdruck Deutschlands, ermittelt für den Zeitraum 1997-2001. Es handelt sich um gerundete Daten nach Schätzwerten von Hoekstra und Chapagain (2008). *Die in Klammern gesetzten, kursiv geschriebenen Zahlenwerte geben die publizierten Originaldaten an, die eine nicht erreichte Genauigkeit vorgeben.*

INTERNER WASSER-FUSS- ABDRUCK 10 ⁹ m ³ /a	EXTERNER WASSER-FUSS- ABDRUCK 10 ⁹ m ³ /a	GESAMTER WASSER-FUSS- ABDRUCK 10 ⁹ m ³ /a
60 (59,86)	70 (67,09)	130 (126,95)

Die Daten in Tabelle 3 zeigen, dass das führende Exportland Deutschland Güter und Dienstleistungen importiert, zu deren Herstellung im Ausland mehr Wasser benötigt wird als zur Herstellung aller Güter und zur Erbringung aller Dienstleistungen im Inland genutzt wird. Dies kann mehrere Ursachen haben, beispielsweise eine hohe Effizienz der Produktion und im Wassermanagement im Inland verglichen mit denjenigen Ländern, aus denen die Güter importiert werden. Diese Problematik wird im Kapitel 4.1 wieder aufgegriffen.

3.3 BLAUER, GRÜNER UND GRAUER WASSER-FUSS-ABDRUCK

Als Blaues Wasser werden das Grundwasser sowie die Oberflächengewässer bezeichnet. Blaues Wasser ist für den Menschen gut verfügbar, es kann gesammelt und transportiert werden und wird beispielsweise in der Landwirtschaft für die künstliche Bewässerung benutzt. Grünes Wasser ist das im Boden kapillar gebundene oder in Pflanzen gespeicherte Wasser. Es stammt aus dem Niederschlag und wird für die örtliche Land- und Forstwirtschaft genutzt. Im langjährigen Mittel sind global 65 % Grünes Wasser und 35 % Blaues Wasser (Zehnder, 2002), jedoch gibt es örtlich und infolge von Dürre und Überschwemmungen auch zeitlich große Unterschiede.

Wie bereits erwähnt, wird Wasser im Allgemeinen nicht verbraucht, sondern infolge einer Nutzung verschmutzt oder im Fall von Kühlwasser (Durchlaufkühler) erwärmt. Lediglich das in die Atmosphäre verdunstete oder sublimierte Wasser kann als verbraucht angesehen werden, da es für die betrachtete Region in der Regel nicht mehr zur Verfügung steht. Dagegen lässt sich verschmutztes Blaues Wasser in Kläranlagen reinigen und einmal oder mehrfach wieder verwenden.

In der Landwirtschaft wird Grünes und Blaues Wasser genutzt. Nach Falkenmark (2003) wird als genutztes Grünes Wasser dasjenige bezeichnet, das unmittelbar vom Niederschlag stammt und durch Verdunstung, im Wesentlichen durch Evapotranspiration, verbraucht wird. Der genutzte Blaue Wasseranteil stammt vom Grund- und/oder Oberflächenwasser und wird ebenfalls durch Verdunstung verbraucht, hauptsächlich durch Evapotranspiration und durch Verdunstung im Zuleitungssystem. Das im Boden versickerte Wasser zählt nicht als genutztes bzw. verbrauchtes Wasser, da es dem System als Grundwasser wieder zugeführt wird (vgl. Kapitel 3.4).

Für industriell oder gewerblich hergestellte Produkte sowie für Dienstleistungen entfällt in der Regel die Nutzung von Grünem Wasser. Als Blauer Wassergehalt dieser Produkte wird nach Hoekstra und Chapagain (2008) derjenige Anteil des genutzten Wassers bezeichnet, der während des Herstellprozesses infolge einer Verdunstung, Verdampfung oder Sublimation in die Atmosphäre abgegeben wird und damit als verbraucht angesehen werden kann, da es nicht in den Bilanzraum zurückkehrt. (Anmerkung: Verdampfung und Sublimation sind in der Literatur nicht ausdrücklich genannt, aber sicherlich ebenfalls gemeint). Entsprechendes gilt für Dienstleistungen und für das im häuslichen Gebrauch genutzte Wasser.

Verschmutztes Wasser wird vielfach als Graues Wasser bezeichnet. Es wird in vielen Ländern nach einer Klärung oder auch ohne Reinigung in der Landwirtschaft eingesetzt. In Deutschland wird diese Wassernutzung aus hygienischen Gründen abgelehnt (Lischeid, 2010). Eine Unterscheidung, ob es im Boden gebunden oder wie Blaues Wasser gut zu handhaben ist und damit in Kläranlagen gereinigt werden kann, wird in der Fachliteratur nicht getroffen.

Nach dem Konzept des Wasser-Fußabdrucks und des Virtuellen Wassers wird der Graue Wasseranteil jedoch anders definiert (Hoekstra und Chapagain, 2008). Bei der Erzeugung von Gütern wird in der Regel Wasser verschmutzt. Als Maß für die Verschmutzung wird dasjenige Wasservolumen gewählt, das zur Verdünnung des Schmutzwassers nötig wäre, um eine gerade noch tolerierbare Standardkonzentration c_{\max} der unerwünschten Stoffe im Wasser zu erreichen. Das auf die Produktmasse bezogene Verdünnungswasser wird als Grauer Wasseranteil

$$v_{\text{grau}} = m_s / (m_p \cdot c_{\max}) \quad (3)$$

bezeichnet. Hierin bedeuten m_s die Masse der unerwünschten Stoffe im Wasser pro Jahr (kg/a) und m_p die Masse des erzeugten Produkts pro Jahr. Mit dem Anteil des genutzten produktbezogenen Grünen (v_g) und Blauen (v_b) Wassers ergibt sich für den gesamten virtuellen Wassergehalt

$$v = v_g + v_b + v_{\text{grau}} \quad (4)$$

Entsprechend gilt für den gesamten Wasser-Fußabdruck

$$WF = WF_g + WF_b + WF_{\text{grau}} \quad (5)$$

Der Graue Wasser-Fußabdruck bzw. der Graue Virtuelle Wassergehalt ist im Allgemeinen eine fiktive Größe, die als Maß für die Wasserbeschaffenheit angesehen werden kann und nicht immer als reale Wassermenge bereitgestellt werden muss. Dagegen müssen das für die Produktion eingesetzte Grüne (im Fall der Landwirtschaft) und Blaue Virtuelle Wasser real vorhanden sein. Daher ist die im Schrifttum gebräuchliche Addition des Grauen Wasseranteils in den Gleichungen (4) und (5) zur Ermittlung des gesamten Virtuellen Wassergehalts bzw. des Virtuellen Wasser-Fußabdrucks problematisch. Hierauf wird im Kapitel 5 zurückgekommen.

Im Fall der Herstellung eines nicht landwirtschaftlichen Erzeugnisses ist der Graue Anteil fragwürdig, da verschmutztes Wasser geklärt und nicht durch Verdünnung „gereinigt“ wird. Die Verdünnung ist sicherlich kein ausreichendes Maß, um den Aufwand zur Klärung eines Schmutzwassers zu charakterisieren. Im Fall von landwirtschaftlichen Erntegütern kann der Graue Wasseranteil Bedeutung haben, der grundsätzlich nicht in Kläranlagen zu reinigen ist, sondern durch Verdünnung mit sauberem Wasser eine tolerierbare Wasserqualität erreichen kann. Der Gehalt von Verunreinigungen des Wassers im Boden beispielsweise aufgrund von nicht optimaler Düngung oder durch Pflanzenschutzmittel verringert sich jedoch auch durch andere Mechanismen und ist erheblich von der Art der Verunreinigung und vom jeweiligen Ackerboden abhängig. Auch die Festlegung einer tolerierbaren Standardkonzentration c_{\max} der Verunreinigung ist kritisch. Der gewählte Ansatz einer Verdünnung ist daher auch bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen problematisch. Dennoch ist anzuerkennen, dass mit diesem Ansatz erstmals versucht wurde, auch die Wasserbeschaffenheit für den virtuellen Wassergehalt und den Wasser-Fußabdruck zu berücksichtigen.

Der Anteil des genutzten Grünen Wassers bzw. v_g oder WF_g ist sowohl für die Umwelt als auch für den Landwirt unkritisch, da Grünes Wasser unmittelbar aus dem Niederschlag gespeist wird und im Allgemeinen keine oder nur geringe Opportunitätskosten verursacht, also keine oder nur geringe möglichen Erlöse entgehen können durch eine alternative Nutzung dieses Wassers. Je nach Vergleich mit einer alternativen Nutzung des Niederschlagwassers sind sogar negative Opportunitätskosten möglich (Lischeid, 2010).

Der Anteil des genutzten Blauen Wassers kann dagegen problematisch sein. Ist in einer Region im langjährigen Mittel die Wasserzufuhr durch direkten Niederschlag oder Zufluss von Oberliegern ausreichend groß gegenüber der gesamten Verdunstung, so ist ein nachhaltiges Wassermanagement möglich. Wird jedoch im langjährigen Mittel in einer Region mehr Blaues Wasser entzogen und durch Verdunstung in die Atmosphäre gegeben als nachgeliefert werden kann, führt dies zu einem Verbrauch der Ressource Wasser, also zu einer nicht mehr nachhaltigen Wasserwirtschaft. In vielen Regionen der Erde wird hauptsächlich durch künstliche Bewässerung in der Landwirtschaft mit der Ressource Wasser nicht nachhaltig gewirtschaftet (Hahn, 2009) mit der Folge von teilweise dramatischen Absenkungen des Grundwasserspiegels oder der Austrocknung von Binnengewässern wie dem Aralsee (Giese et al., 1998). Der Virtuelle Blaue Wassergehalt bzw. der Blaue Wasser-Fußabdruck bedarf daher der besonderen Aufmerksamkeit. Leider fehlen in der Literatur Angaben darüber, welcher Anteil des Blauen Wassers in einer betrachteten Region genutzt werden kann, um gerade noch eine nachhaltige Bewirtschaftung erreichen zu können.

Das Graue Wasser in der Definition von Hoekstra (Hoekstra und Chapagain, 2008) ist im Allgemeinen – wie bereits erwähnt – eine fiktive Größe zur sehr vereinfachten Bewertung der Wasserbeschaffenheit. Bei der Erzeugung von Ernteprodukten in der Landwirtschaft kann der Anteil des Grauen Wassers durch Optimierung des Gebrauchs geeigneter Dünge- und Pflanzenschutzmittel klein gehalten werden. Mit verfahrenstechnischen Methoden werden heute mineralische Düngemittel so formuliert, dass die Wirkstoffe verzögert dann freigesetzt werden, wenn sie von den Pflanzen benötigt werden. Entsprechendes gilt für die technische Formulierung von Pflanzenschutzmitteln, die ausreichend schnell abgebaut werden sollten. Auch wenn derzeit die neuen technischen Formulierungen noch längst nicht überall und nicht optimal eingesetzt werden, so wird sich diese Entwicklung zukünftig durchsetzen, da insgesamt Kosten

gegenüber den früheren Mitteln gespart werden. Ausgenommen von dieser Entwicklung ist die organische Düngung, die zukünftig den höheren Anteil am Grauen Wasser-Fußabdruck bringen könnte. Auch beim Reisanbau bestehen noch Herausforderungen (Chapagain und Hoekstra, 2010), sodass dort auch weiterhin mit einem Grauen Wasser-Fußabdruck zu rechnen sein wird. Schließlich kann das Auswaschen von Salz aus dem Boden eine erhebliche Wassermenge benötigen (Frede, 2010).

Für industriell oder gewerblich hergestellte Produkte ist der Anteil des Grauen Wassers, dargestellt als sauberes Wasser zur Verdünnung von Schmutzwasser in der Definition von Hoekstra (Hoekstra und Chapagain, 2008), nicht hilfreich, wie bereits erläutert wurde. Angaben über den Grauen Wasser-Fußabdruck von Industrieprodukten oder gewerblich gefertigten Erzeugnissen sind nach Wissen des Autors bisher nicht publiziert worden.

3.4 SICKERWASSER UND WASSER-FUSSABDRUCK

In einer jüngst erschienenen Arbeit (Chapagain und Hoekstra, 2010) wird neben dem Virtuellen Blauen, Grünen und Grauen Wasser auch das Sickerwasser beim Anbau von Reis angegeben. Teilweise werden auch die jeweiligen Anteile des Sickerwassers vermerkt, die aus dem Niederschlag und dem für die Bewässerung benutzten Blauen Wasser stammen. Das Sickerwasser ist nicht dem Virtuellen Wasser bzw. dem Wasser-Fußabdruck zuzuordnen, da es dem Wassereinzugsgebiet unmittelbar wieder zugeführt wird und damit erneut verwendet werden kann. Es liefert jedoch Hinweise über die in der Landwirtschaft je nach Bodenstruktur und weiteren Parametern insgesamt benötigte Wassermenge. Tabelle 4 zeigt als Beispiel die durchschnittliche landwirtschaftliche Reisproduktion während der Jahre von 2000 bis 2004 aus 33 Ländern, die ca. 98 % der weltweiten Reisernte produzieren.

Leider fehlen Daten über die jeweiligen Niederschlagsmengen. Geht man von einer jährlichen Regenmenge von 750 mm Wasser aus, so stünden bei der gesamten Ackerfläche von $1.500 \cdot 10^9 \text{ m}^2$ (Chapagain und Hoekstra, 2010) pro Produktmenge ca. 1.900 Liter Wasser/kg Reis zur Verfügung, dagegen werden nur $v_g + v_b \approx 1.200$ Liter Wasser/kg Reis durch Evapotranspiration verbraucht. Grundsätzlich wäre also für den globalen Durchschnitt ein nachhaltiges Wassermanagement für den Reisanbau möglich. Wie die oben genannten Autoren feststellen, bilden Länder wie Pakistan und die USA mit einem vergleichsweise hohen Anteil an Blauem Wasser für die Bewässerung



Ausnahmen, sodass eine globale Aussage nicht genügt, sondern die regionalen Bedingungen einfließen müssen.

Die hier genannten Zahlenwerte für den durchschnittlichen Jahresniederschlag dienen nur einer ersten groben Schätzung. Zu

berücksichtigen ist, dass in vielen Gebieten der Erde, in denen Reis angebaut wird, ausgeprägte Regenzeiten mit sehr hohen Niederschlägen existieren, an die der Reisanbau angepasst ist (Frede, 2011).

Tabelle 4: Virtueller Grüner (v_g), Blauer (v_b), Grauer (v_{grau}) und gesamter Wassergehalt ($v_{\text{ges}} = v_g + v_b + v_{\text{grau}}$) sowie bezogener Anteil des Sickerwassers bei der Agrarerzeugung von Reis. Die Werte sind in Liter Wasser pro kg Reis angegeben für die jährliche Produktion von durchschnittlich $590 \cdot 10^6$ t Reis während der Periode 2000 – 2004. Die gerundeten Zahlenwerte wurden aus den Originaldaten von Chapagain und Hoekstra (2010) ermittelt.

PRODUKTION 10^6 t/a	v_g Liter/kg	v_b Liter/kg	v_{grau} Liter/kg	v_{ges} Liter/kg	v_{sicker} Liter/kg
590	630	580	110	1.320	1.030

4. ANALYSE DER KONZEPTE DES VIRTUELLEN WASSERS UND DES WASSER-FUSSABDRUCKS

4.1 DER HANDEL MIT PRODUKTEN ALS MASS FÜR DEN VIRTUELLEN WASSERTRANSPORT

Der Handel mit Gütern erfordert den Transport dieser Produkte. Selbstverständlich muss nicht das Virtuelle Wasser, also die teilweise große Wassermenge mittransportiert werden, die zur Herstellung der Handelswaren benötigt wird. Der Transport des Virtuellen Wassers zwischen Regionen und Nationen wird als Virtueller Wasserstrom bezeichnet. Wie in Kapitel 2.1 bereits vermerkt, ist der Virtuelle Wasserstrom eine fiktive Größe, dagegen muss das Virtuelle Wasser zum Zeitpunkt der Herstellung der Produkte real vorhanden sein und genutzt werden. Der Virtuelle Wasserexport ist das von einem Land exportierte Virtuelle Wasser. Es ist also das Wasser, das zur Herstellung von exportierten Gütern oder zur Erbringung exportierter Dienstleistungen im eigenen Land benötigt wurde. Entsprechend ist der Virtuelle Wasserimport das von einem Land importierte Virtuelle Wasser infolge der Einfuhr von Gütern und Dienstleistungen aus anderen Ländern. Für einen festgelegten Zeitraum kann man die Virtuellen Wasserströme bilanzieren. Diese Virtuelle Wasserbilanz für ein Land wird als positiv vereinbart (Netto-Einfuhr), wenn mehr Virtuelles Wasser importiert als exportiert wird. Im umgekehrten Fall (Netto-Ausfuhr) spricht man von einer nega-

tiven Virtuellen Wasserbilanz eines Landes während einer festgelegten Zeitperiode. Die hier nur knapp zusammengestellten Begriffe sind ausführlich in der Literatur beschrieben und durch viele Beispiele der internationalen Handelsströme quantifiziert (Hoekstra und Chapagain, 2008). Ein Beispiel zeigt Tabelle 5. Amerika ist die Region mit dem größten Netto-Export von Virtuellem Wasser, wobei die Mengen von Nord- und Südamerika jeweils etwa gleich groß sind. Europa, vor allem Westeuropa ($150 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ Wasser pro Jahr), sowie Zentral- und Südasiens mit China und Indien sind die Regionen mit dem größten Netto-Import von Virtuellem Wasser. Da die Angaben über die Mengen Virtuellen Wassers nur grobe Schätzwerte sind, geben die Daten lediglich ungefähre Vorstellungen über die Virtuellen Wasserströme.

Wie die Daten anderer Autoren (Zimmer und Renault, 2003) zeigen, schwanken die Werte je nach Schätzung so erheblich, dass Vorsicht geboten ist. Ein Beispiel zeigt Tabelle 6. Auch wenn die Daten nicht unmittelbar vergleichbar sind, so sollten doch zumindest die Größenordnungen übereinstimmen (vgl. Tab. 5 und 6).

Tabelle 5: Jährliche Virtuelle Netto-Wasserströme von Regionen der Erde für den Zeitraum von 1997-2001. Die Daten (Hoekstra und Chapagain, 2008) gelten für den Handel mit Agrarprodukten und sind gerundet

GEBERREGIONEN (REGIONEN MIT NETTOEXPORT)	$10^9 \text{ m}^3/\text{a}$	NEHMERREGIONEN (REGIONEN MIT NETTOIMPORT)	$10^9 \text{ m}^3/\text{a}$
Amerika	-215	Europa	170
Australien und Ozeanien	-70	Mittel- und Südasiens	150
Afrika	-65	Mittlerer Osten	50
Südostasien	-30	Ehemalige UdSSR	10

Tabelle 6: Jährliche Virtuelle Netto-Wasserströme einiger Regionen der Erde für das Jahr 1999. Die Daten (Zimmer, Renault, 2003) gelten für den Handel mit landwirtschaftlichen Ernteprodukten und sind gerundet.

GEBERREGIONEN (REGIONEN MIT NETTOEXPORT)	$10^9 \text{ m}^3/\text{a}$	NEHMERREGIONEN (REGIONEN MIT NETTOIMPORT)	$10^9 \text{ m}^3/\text{a}$
Nord- und Mittelamerika	-150	Europäische Union	7
Süd-Amerika	-120	Asien	244
Australien und Ozeanien	-110	Afrika	50

Bei den Geberregionen ist die Übereinstimmung zufriedenstellend, bei den Nehmerregionen sind die Abweichungen für Europa und Afrika zu groß. Während bei Hoekstra und Chapagain (2008) Afrika eine Geberregion ist, zählt diese Region bei Zimmer und Renault (2003) zu den Nehmerregionen. Die stark schwankenden und sich teilweise widersprechenden Angaben über Virtuelle Wassermengen bzw. den Wasser-Fußabdruck sind für die Fachliteratur typisch (vgl. auch Lischeid, 2010). Nach Einschätzung des Autors dürfte im gezeigten Beispiel die jüngere Literatur die zuverlässigeren Daten enthalten, zumal die ältere Literatur bekannt war und inzwischen größere Datenmengen für die Auswertungen zur Verfügung stehen.

Neben dem Handel mit Virtuellem Wasser kann auch die Lagerung von Agrarprodukten oder Lebensmitteln betrachtet werden, die als Speicherung von Virtuellem Wasser angesehen werden kann. Nach Untersuchungen von Renault (2003) entspricht das weltweit gelagerte Getreide einem Virtuellen Wasservolumen von 500 km^3 und 830 km^3 , wenn die Lagerung von Zucker, Fleisch und Öl hinzugerechnet wird. Der zuletzt genannte Wert entspricht 14 % des Wassers aus den verfügbaren Wasser-Reservoirs bzw. 11 % des globalen jährlichen Wasser-Fußabdrucks. Werden noch alle auf der Erde lebenden Rinder und Schafe hinzugezählt, so entspricht dies einem Virtuellen Wasservolumen von 4.600 km^3 (77 % der verfügbaren Wasser-Reservoirs bzw. 61 % des globalen jährlichen Wasser-Fußabdrucks) (Renault, 2003).

Nach den veröffentlichten Schätzwerten gehört Deutschland zu den Netto-Importeuren von Virtuellem Wasser. Die Streubreite der publizierten Virtuellen Netto-Wasserströme reicht von $1 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ (Ernteprodukte 1999, Zimmer und Renault, 2003) bis $32,1 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ (Ernteprodukte 1997-2001, Hoekstra und Chapagain, 2008) bzw. $30,7 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ (alle Agrarprodukte 1997-2001, Hoekstra und Chapagain, 2008). Charakteristisch für fast alle veröffentlichten Daten über Virtuelles Wasser und den Wasser-Fußabdruck sind nicht nur die großen Schwankungsbreiten, sondern auch Angaben der Zahlenwerte mit teilweise mehreren Stellen hinter dem Komma, die eine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen. Angaben etwa über den gesamten Wasser-Fußabdruck Deutschlands „in Höhe von 159,5 Kubikkilometern pro Jahr“ bzw. im Durchschnitt für jeden Bürger Deutschlands einen Verbrauch „von täglich 5.288 Liter Wasser“ (Sonnenberg et al., 2009) sind nicht seriös und sollten zumindest gerundet werden (vgl. Kapitel 3.2).

Durch den Import von wasserintensiven Gütern oder Dienstleistungen kann eine Nation die eigenen Wasserressourcen schonen. Ist der Virtuelle Wassergehalt eines importierten Produkts geringer als der Virtuelle Wassergehalt des gleichen Produkts, wenn man es im eigenen Land produziert hätte, so wird insgesamt Wasser eingespart. Umgekehrt geht insgesamt Wasser verloren. Es war ursprünglich ein wesentliches Ziel des Virtuellen Wasserhandels, Agrarrohstoffe von wasserreichen Regionen in wasserarme Regionen zu transportieren und damit Wasserressourcen in ariden und semiariden Regionen zu schonen und insgesamt Wasser einzusparen. Durch den internationalen Handel mit landwirtschaftlichen Produkten werden derzeit global etwa 5 % des zur Erzeugung dieser Güter benötigten Wassers eingespart (Hoekstra und Chapagain, 2008). Zu bedenken ist, dass die Einsparung nicht auf einem geringeren Wasserverbrauch durch Evapotranspiration beruhen muss, sondern auch durch einen höheren Flächenertrag erreicht werden kann, da das auf die Produktmasse bezogene Virtuelle Wasser, also der Virtuelle Wassergehalt, maßgebend ist. Die Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte in Ländern mit ungünstiger Bewässerung bei schlechtem Wassermanagement und ineffizienter Landwirtschaft führt zu hohen Virtuellen Wassergehalten und damit zu einem hohen Wasserverbrauch pro Produktmenge. Derartige Bedingungen trifft man vielfach in armen Ländern an, deren Mittel für eine nachhaltige Wasserwirtschaft und effiziente Landwirtschaft nicht reichen. Der Transport von Erntegütern von Regionen mit effizienter Wasser- und Landwirtschaft in diese Länder führt zwar aus globaler Sicht insgesamt zu einer Wasserersparnis, ist aber nicht befriedigend. Günstiger wäre es sicherlich, die Effizienz von Wassermanagement und Landwirtschaft dort zu steigern, wo noch ein hohes Potential besteht. Das Beispiel zeigt, dass eine globale Wasserersparnis nach dem Konzept der Virtuellen Wasserströme bzw. des Wasser-Fußabdrucks nicht immer erstrebenswert sein muss, insbesondere dann nicht, wenn das Wasser in Regionen gespart wird, in denen Wasser kein knappes Gut ist.

4.2 DER WASSER-FUSSABDRUCK

Der Wasser-Fußabdruck ist, wie in Kapitel 3.1 definiert wurde, ein auf den ersten Blick einfach zu verstehender Begriff, nämlich die pro Zeit von einer Einheit genutzte Wassermenge. Die Einheit können eine oder mehrere Personen, Unternehmen, Regionen oder Nationen sein. Der Wasser-Fußabdruck kann jedoch auch als genutzte Wassermenge pro Menge eines Produkts definiert werden, dann ist dieser Begriff gleichbedeutend mit dem Virtuellen Wassergehalt (Kapitel 3.1). Der in der Öffentlichkeit viel-

fach missverständene Begriff „virtuell“ entfällt bei dieser Definition. Aus der jeweiligen Dimension wie $\text{m}^3 \text{ Wasser}/(\text{Person} \cdot \text{a})$, $\text{m}^3 \text{ Wasser}/(\text{Region} \cdot \text{a})$ oder $\text{m}^3 \text{ Wasser}/(\text{kg Produkt})$ geht hervor, was gemeint ist. Kauft ein Verbraucher beispielsweise ein importiertes Produkt, so hinterlässt er in dem Exportland einen „Fußabdruck“ mit der Wassermenge, die zur Erzeugung des Produktes im Exportland benötigt wurde.

Wie bereits genannt, ist der Fußabdruck pro Produktmasse umso größer, je schlechter das Wassermanagement und je uneffektiver die Produktion im Exportland ist. Das Konzept des Wasser-Fußabdruckes wird auch damit begründet, dass nicht nur den Produzenten, sondern auch den Verbrauchern die Verantwortung für den Wasserbedarf verdeutlicht werden soll (Hoekstra und Chapagain, 2008) mit dem Ziel, diesen Wasserbedarf einzuschränken. Produzenten haben mit dem Wasser-Fußabdruck die Möglichkeit, ihren Wasserbedarf mit demjenigen ihrer Mitbewerber nutzbringend zu vergleichen. Solange jedoch, wie in vielen Ländern der Erde üblich, Blaues Wasser hoch subventioniert und vor allem in der Landwirtschaft mitunter nahezu unentgeltlich genutzt wird, ist das Konzept des Wasser-Fußabdrucks wenig hilfreich, eine Wasserverschwendung zu vermeiden und die Wassernutzung einzuschränken. Die Verbraucher haben darauf unmittelbar kaum einen Einfluss, gleichwohl können die Konzepte des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdrucks helfen, das Bewusstsein für den hohen Wasserbedarf jedes Einzelnen vor allem in den hochentwickelten Ländern zu schärfen.

Einfluss auf den persönlichen Wasser-Fußabdruck haben die Ernährungsgewohnheiten, vor allem die Menge des Fleischverzehr. Bei einer täglichen Nahrungs-Energiezufuhr von 10.000 kJ und vegetarischer Kost wären für die Ernährung eines normalgewichtigen Menschen unter günstigsten Bedingungen mindestens 230 m^3 Wasser pro Jahr (630 Liter Wasser pro Tag) und bei einer Kost mit einem Anteil von 20 % Fleisch 640 m^3 Wasser pro Person und Jahr (ca. 1.700 Liter Wasser pro Tag) nötig (Zehnder, 2002). Geht man als grobe Abschätzung davon aus, dass 50 % zusätzliches Virtuelles Wasser benötigt wird infolge der üblichen Ernte- und Nachernteverluste, infolge des Wasserbedarfs für die Herstellung von Lebensmitteln sowie infolge von Speiseabfällen, so ergibt sich für die Ernährung ein jährlicher Pro-Kopf-Wasserbedarf von 350 m^3 (rund 1.000 Liter Wasser pro Tag) bei vegetarischer Kost, und rund 1.000 m^3 Wasser (2.700 Liter Wasser pro Tag) bei Mischkost mit 20 % Fleisch und Fleischerzeugnissen (Schubert, 2007). Es handelt sich um Mindestschätzwerte, im Mittel dürfte der Pro-Kopf-Wasserbedarf etwas

höher liegen (Brabeck-Letmathe, 2008). Das Beispiel zeigt, dass der persönliche Wasser-Fußabdruck bei einer Mischkost im Vergleich zu einer vegetarischen Kost um den Faktor zwei bis drei größer ist, also Konsumenten durch ihre Ernährungsgewohnheiten ihren persönlichen Wasserbedarf erheblich beeinflussen können.

Erfahrungsgemäß lassen sich – sieht man von Einzelfällen ab – die Verzehrsgewohnheiten von Verbrauchern durch diese oder ähnliche Informationen nicht wesentlich ändern. Selbst die mit großem Aufwand verbreiteten Informationen, dass in Deutschland wie in vielen anderen reichen Ländern dieser Erde der hohe Fleischverzehr den Konsumenten gesundheitliche Nachteile bringen kann, hat bisher keine nachweisbaren Änderungen in den Verzehrsgewohnheiten gebracht. Es sind daher Zweifel angebracht, ob das Konzept des Wasser-Fußabdrucks helfen kann, Verbraucherentscheidungen zu beeinflussen. Dennoch wird in Broschüren über Virtuelles Wasser bzw. den Wasser-Fußabdruck immer wieder an „neue Einsichten“ („Durch unser Kaufverhalten können wir Einfluss nehmen, ... Wassermangel ... in anderen Ländern entgegen zu wirken...“) (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, 2009) oder an das Gewissen appelliert („Virtuelles Wasser' drückt aus, dass wir es uns auf Kosten des Wasserhaushalts anderenorts gut gehen lassen“.) (BBU, regioWASSER, 2006). Die Aussagen stehen vor dem Hintergrund, dass Deutschland zu den Netto-Importeuren von Virtuellem Wasser gehört (Kapitel 4.1). Die in der BBU Broschüre diskutierte Frage, woher unser Wasser tatsächlich kommt, genügt jedoch nicht. Ebenso wichtig ist die Frage, um welche Art des Wassers es sich handelt. Diese Frage wird im Folgenden behandelt.

Im Schrifttum werden beim Handel mit Gütern überwiegend Virtuelle Wasserströme betrachtet und meist nicht zwischen Grünem, Blauem und Grauem Wasser unterschieden, sondern das gesamte Virtuelle Wasservolumen zugrunde gelegt, das zwischen Regionen und Nationen virtuell bewegt wird. Erst in jüngerer Zeit werden Grüne, Blaue und teilweise auch Graue Virtuelle Wasserströme bzw. Wasser-Fußabdrücke in der Fachliteratur getrennt betrachtet. Durch Modellierung haben Rost et al. (2008) für landwirtschaftliche Erntegüter im Zeitraum 1971 bis 2000 die globalen Werte für den gesamten (WF), den Grünen (WF_g) und den Blauen (WF_b) Wasser-Fußabdruck wie folgt angegeben (Daten gerundet):

WF_g	= 7.200 km ³ /a (85 %)
WF_b	= 1.300 km ³ /a (15 %)
WF	= 8.500 km ³ /a (100 %)

Im Vergleich dazu wurde der Grüne Wasser-Fußabdruck für Weideland mit rund 8.000 km³/a und der Wasser-Fußabdruck für die übrige globale Vegetation mit rund 45.000 km³/a angegeben. Der Graue Wasser-Fußabdruck (WF_{grau}) in der Definition von Hoekstra (Kapitel 3.3) wurde nicht berücksichtigt. Der gesamte Wasser-Fußabdruck WF liegt etwas höher als der in Kapitel 3.2 angegebene Wert von 7.500 km³/a, ist aber noch im Rahmen der Schätzgenauigkeit. Etwa die Hälfte (700 km³/a) des Blauen Wasser-Fußabdrucks, der für die Bewässerung der Felder benötigt wird, stammt aus nicht erneuerbaren Ressourcen (z. B. fossiles Grundwasser) oder von Oberliegern, die nicht zum Gebiet der jeweils betrachteten Nationen gehören. Dies bedeutet, dass weniger als 10 % der Wasserressourcen für die Produktion landwirtschaftlicher Rohstoffe als besonders kritisch anzusehen sind.

Im Standardwerk über den globalen Wasser-Fußabdruck (Hoekstra und Chapagain, 2008) werden für alle Güter folgende Daten angegeben (Zahlenwerte gerundet):

WF_g	= 5.300 km ³ /a (72 %)
WF_b	= 2.100 km ³ /a (28 %)
WF	= 7.400 km ³ /a (100 %)

Nur für die Produktion landwirtschaftlicher Ernteprodukte geben die Autoren an:

WF_g	= 5.300 km ³ /a (83 %)
WF_b	= 1.100 km ³ /a (17 %)
WF	= 6.400 km ³ /a (100 %)

In einer kürzlich erschienenen Arbeit (Mekonnen und Hoekstra, 2010a) wurden für den globalen Wasser-Fußabdruck für landwirtschaftliche Ernteprodukte folgende Daten ermittelt (Zeitraum 1996 bis 2005, Zahlenwerte gerundet):

WF_g	= 5.800 km ³ /a (78 %)
WF_b	= 900 km ³ /a (12 %)
WF_{grau}	= 700 km ³ /a (10 %)
WF	= 7.400 km ³ /a (100 %)

Die Addition des (fiktiven) Grauen Wasser-Fußabdrucks zur Ermittlung des gesamten Wasser-Fußabdrucks ist aus den in Kapitel 3.3 genannten Gründen fragwürdig (vgl. auch Kapitel 5). Abweichungen zu den von Rost et al. (2008) sowie zu den von Hoekstra und Chapagain (2008) ermittelten Daten liegen im üblichen Bereich der Schwankungsbreiten derartiger Schätzwerte. Die beiden zuletzt zusammengestellten Wasser-Fußabdrücke beziehen sich auf die gesamten landwirtschaftlichen Ernteprodukte und unterscheiden nicht, welcher Anteil im Erzeugerland genutzt wird und welcher Anteil für den internationalen Handel bereit steht.

In einer interessanten Arbeit wurde kürzlich der Anteil des Grünen Virtuellen Wassers am gesamten Virtuellen Wasser beim globalen internationalen Handel mit landwirtschaftlichen Ernteprodukten für den Zeitraum von 1998 bis 2002 mit rund 94% angegeben (Liu et al., 2009). Da Grünes Virtuelles Wasser, das aus dem erneuerbaren Niederschlag stammt, mit keinen oder nur geringen Opportunitätskosten verbunden ist (vgl. Kapitel 3.3), bedeutet dieses Ergebnis, dass nur ca. 6% der durch internationalen Handel entstandenen Virtuellen Wasserströme bzw. der globalen Wasser-Fußabdrücke kritisch sein könnten im Hinblick auf eine Übernutzung der Ressource Wasser im exportierenden Land. Auch wenn die ermittelten 94 % des Grünen Wassers am gesamten gehandelten Virtuellen Wassers noch durch weitere Untersuchungen gesichert werden sollten, so wird doch klar, dass die Bedeutung der gesamten Virtuellen Wasserströme im Hinblick auf die Übernutzung (exportierendes Land) oder Schonung der eigenen Ressourcen (importierendes Land) eingeschränkt werden muss. Dennoch gibt es Länder und Regionen, die sowohl für den Eigenbedarf als auch für den Export landwirtschaftlicher Güter und anderer Produkte kein nachhaltiges Wassermanagement betreiben. Das derzeitige Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdruckes gibt keine Auskunft darüber, wie hoch der Anteil des nicht nachhaltigen Wassers an den Virtuellen Wasserströmen oder am Virtuellen Wassergehalt einer Ware ist und welche Regionen die Ressource Wasser übernutzen. Angesichts der Tatsache, dass in vielen Regionen der Erde infolge von Subventionen für Wasser keine kostendeckenden Marktpreise zu bezahlen sind, wären derartige Informationen nicht nur für die Produzenten, sondern auch für die Verbraucher hilfreich und nützlich. Produzenten könnten auf ein besseres Wassermanagement achten. Konsumenten könnten sich informieren, welche Waren aus welchen Ländern mit einer Übernutzung der örtlichen Wasserressourcen verbunden sind. Das bisherige Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des

Wasser-Fußabdrucks ist nicht dazu geeignet, diese Fragen zu beantworten. Hierzu ist, wie in Kapitel 5 erläutert wird, ein modifiziertes Konzept sinnvoller.

4.3 DAS KONZEPT DES WASSER-FUSSABDRUCKS FÜR REGIONEN

4.3.1 DAS KONZEPT FÜR KLEINE REGIONEN

Für den Wasser-Fußabdruck von Nationen und großen Regionen gibt es ein umfangreiches Schrifttum, das zu einem Teil im „Water Footprint Network“ (WFN, 2008) zusammengestellt ist. Wie bereits genannt wurde, handelt es sich um grobe Schätzwerte, die dazu dienen, die Virtuellen Wasserströme zwischen Nationen und großen Regionen abzuschätzen. Aus den ebenfalls zusammengestellten Daten zum Virtuellen Wassergehalt einzelner Güter erhält man eine Vorstellung, wie viel Wasser nötig ist, um eine bestimmte Menge eines Produkts an einem betrachteten Ort herzustellen. Da außer der benötigten Wassermenge noch viele weitere Parameter zu berücksichtigen sind (vgl. Kapitel 4.2), ist die Interpretation der erhobenen Daten schwierig. Auch hier handelt es sich um Schätzwerte, die großen örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterliegen. Nötig wäre noch dazu die Angabe der maßgeblichen Parameter wie die jeweilige Bodennutzung bei Agrarprodukten und die Effizienz der Produktion bzw. des Wassermanagements. Aus globaler Sicht ist dieses Wissen für eine erste Übersicht möglicherweise ausreichend, soll jedoch eine kleine Region untersucht werden mit dem Ziel, Handlungsoptionen vorzuschlagen, so kann auf detaillierte Untersuchungen nicht verzichtet werden. Derartige Detailuntersuchungen liegen nach Wissen des Autors bisher nicht vor. Auch die Berechnung von charakteristischen Werten von gemessenen oder erhobenen Verteilungen wird im Schrifttum über Virtuelles Wasser oder den Wasser-Fußabdruck nicht vorgestellt. Aus wie auch immer gewonnenen Mittelwerten des Wasser-Fußabdrucks lassen sich im Allgemeinen keine ausreichenden Informationen für die Landwirte einer kleinen Region ziehen. Für Fragen der Globalisierung des Wassers (Hoekstra und Chapagain, 2008) kann jedoch das Konzept des Virtuellen Wassers hilfreich sein, insbesondere dann, wenn das Ziel verfolgt wird, Güter, zu deren Herstellung große Mengen an Wasser erforderlich sind, möglichst nicht in Ländern mit großer Wasserknappheit zu produzieren. Auf einige der hiermit zusammenhängenden Fragen wird noch später zurückgekommen.

4.3.2 BRAUCHBARKEIT DES KONZEPTS FÜR DIE REGION BERLIN-BRANDENBURG

Die Region Berlin-Brandenburg ist die niederschlagsärmste Länderrregion Deutschlands. In zwei ausführlichen Diskussionspapieren wurden der Landschaftswasserhaushalt (Lischeid, 2010) und die Wasserbilanzen (Grünewald, 2010) dieser Region vorgestellt. Im langjährigen Mittel (1961 – 1990) liegt der Niederschlag (550 – 650 mm/a) in dieser Region etwa um ein Drittel unter dem durchschnittlichen Niederschlag in Deutschland (ca. 860 mm/a) (Grünewald, 2010). Die gesamte Wasserbilanz für diese Region ergibt sich im langjährigen Mittel pro Jahr aus den in Tabelle 7 zusammengestellten Daten, wobei vorausgesetzt ist, dass die in der Region gespeicherte Wassermenge während der betrachteten Zeitperiode konstant bleibt.

Die Verdunstung setzt sich zusammen aus der Evapotranspiration (493 mm/a) und der Verdunstung (11 mm/a) von Wasser, das von Industrie, Gewerbe und Haushalten genutzt wird (84 mm/a), von dem schließlich nach einer Reinigung 73 mm/a in den Abfluss gelangen. Die Daten sind jeweils in mm^3 Wasser pro Jahr und mm^2 Fläche der Region ($30.368 \text{ km}^2 \approx 30,37 \cdot 10^{15} \text{ mm}^2$) angegeben. Zum Vergleich enthält Tabelle 8 die Daten für Deutschland mit einer Fläche von 357.112 km^2 (SÄBL, 2010).

Der vergleichsweise geringe Niederschlag in der Region Berlin-Brandenburg ist insbesondere für die Landwirtschaft nachteilig. Dennoch spielt heute in der Region Berlin-Brandenburg die künstliche Bewässerung von Feldern, also die Bewässerungsfeldwirtschaft, keine Rolle mehr. Seit nach der Wiedervereinigung für die Bewässerung keine Subventionen mehr gewährt werden (Kahlenborn und Kraemer, 1999) und der Wasserpreis nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie kostendeckend bestimmt werden muss, lohnt sich eine Beregnung aus betriebswirtschaftlichen Gründen nicht mehr und kommt daher nur für wenige Sonderkulturen in Frage (Lischeid, 2010). Sieht man von diesen Sonderkulturen ab, wird also für die Feldwirtschaft in der Region Berlin-Brandenburg fast kein Blaues, sondern nur Grünes Wasser verwendet. Ähnliches gilt für Deutschland (Daten von 2007), da weniger als 0,1 % des erneuerbaren Blauen Wassers von der Landwirtschaft genutzt wird im Vergleich zu 2,7 % für die öffentliche Wasserversorgung, 3,8 % für Bergbau/Verarbeitendes Gewerbe (einschließlich Industrie) sowie 10,4 % für Wärmekraftwerke (davon verdunsten jedoch nur 3 % des Wassers); 83,1 % bleiben ungenutzt (UBA, 2010).



Trotz dieser im Vergleich zu vielen wasserarmen Ländern der Erde günstigen Wasserbilanz ist zu bedenken, dass es sich um Mittelwerte handelt, sodass es zeitlich und regional insbesondere während der Hauptvegetationsperiode zu einer Wasserknappheit kommen kann, die zu einer Konkurrenz der Nutzung des Grundwassers zwischen der öffentlichen Wasserversorgung und der Industrie einerseits und der Landwirtschaft andererseits führen kann (Steiner et al., 1996). Ferner ist zu berücksichtigen, dass das abfließende Wasser nur teilweise genutzt werden kann, da beispielsweise bei Hochwasser ein möglichst schneller Abfluss nötig ist, sofern keine ausreichende Speichermöglichkeit vorhanden ist. Daher sollten die Anstrengungen für ein gutes Wassermanagement mit ausreichender Speicherung von Wasser nicht nachlassen.

Die Region Berlin-Brandenburg ist aus globaler Sicht eine sehr kleine Region. Wie im Kapitel 4.3.2 dargestellt wurde, wären viele Detailuntersuchungen nötig, um das derzeitige Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdrucks zielführend einsetzen zu können. Nach Kenntnis des Autors stehen Ergebnisse von derartigen detaillierten Untersuchungen, die über einfache Schätzwerte hinausgehen, nicht zur Verfügung. Darüber hinaus wird in der Feldwirtschaft der Region fast nur Grünes Wasser verwendet, das mit keinen oder nur sehr geringen Opportunitätskosten verbunden ist. Bereits Lischeid (2010) hat zusammenfassend festgestellt, dass das Konzept des Virtuellen Wassers „für die Steuerung der Landnutzung in der Region Brandenburg-Berlin... als wenig hilfreich angesehen“ wird. Dieser Bewertung schließt sich der Autor hinsichtlich des bisherigen Konzepts des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdrucks für die betrachtete Region an.

Tabelle 7: Wasserbilanz der Region Berlin-Brandenburg nach Angaben des Landesumweltamtes Brandenburg (langjähriges Mittel 1961-1990, Stand 2000, zitiert nach Grünewald, 2010).

ZUFLUSS IN DIE REGION mm/a		NIEDERSCHLAG mm/a		VERDUNSTUNG mm/a		ABFLUSS AUS DER REGION mm/a
344	+	617	=	508	+	453

Tabelle 8: Jährliche Wasserbilanz für Deutschland (D) im langjährigen Mittel, 1961 bis 1990 (vgl. Grünewald, 2010).

ZUFLUSS NACH D mm/a		NIEDERSCHLAG mm/a		VERDUNSTUNG mm/a		ABFLUSS AUS D mm/a
199	+	859	=	532	+	526

5. VORSCHLAG FÜR EIN MODIFIZIERTES KONZEPT DES VIRTUELLEN WASSERS

5.1 EINSCHRÄNKUNGEN DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT DES SEITHERIGEN KONZEPTS

Das ursprüngliche Konzept des Virtuellen Wassers unterschied nicht zwischen Grünem, Blauem und eventuell Grauem Virtuellem Wasser. Die Darstellungen des Wasser-Fußabdrucks der Nationen und der Virtuellen Wasserströme beziehen sich auch in der jüngeren Literatur jeweils auf das gesamte Virtuelle Wasser. Im Hinblick auf einen globalen „virtuellen“ Wasserhandel oder hinsichtlich der Frage, welche gesamte Wassermenge eine wasserarme Nation spart bzw. ein Land abgibt, wenn landwirtschaftliche Güter importiert bzw. exportiert werden, ist diese Darstellung gerechtfertigt. Durch die Einführung des Grünen und Blauen Wassers wurde das Konzept erweitert. Wie aus dem in Kapitel 4.2 zusammengestellten Datenmaterial hervorgeht, sind über 80 % des für die Produktion landwirtschaftlicher Erntegüter genutzten Wassers aus dem Niederschlag stammendes, erneuerbares Grünes Wasser. Werden nur die international gehandelten Erntegüter betrachtet, liegt der Anteil des Grünen Wasser-Fußabdrucks nach Literaturangaben mit 94 % noch höher (Kapitel 4.2). Wie bereits erwähnt wurde, wird das Konzept des Virtuellen Wassers vielfach dazu benutzt, Konsumenten dahin zu beeinflussen, den Verbrauch importierter Lebensmittel einzuschränken, zu deren Herstellung große Wassermengen erforderlich sind. Wäre nur Grünes Wasser für die landwirtschaftliche Erzeugung derartiger Produkte erforderlich, wäre die genannte Einflussnahme nicht gerechtfertigt, sofern für das Niederschlagswasser keine oder nur sehr geringe Opportunitätskosten anfallen. Im Gegenteil, durch die Verwendung des Niederschlagswassers für landwirtschaftliche Produkte entsteht ein Nutzen, der dem Exportland ohne Landwirtschaft in der Regel entgehen würde. Kaffeepflanzen, die in klimatisch günstigen Regionen mit ausreichend Niederschlag kultiviert werden, sind ein gutes Beispiel für die sinnvolle Nutzung des Grünen Wassers für vergleichsweise teure landwirtschaftliche Exportgüter. Selbst wenn eine künstliche Bewässerung nötig wäre, muss dies kein Nachteil sein, solange eine nachhaltige Wasserwirtschaft in dieser Region gewährleistet ist (z. B. nachhaltige Kaffeeerzeugung im Rahmen des Sustainable Agriculture Network (SAN)). Das bestehende Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdrucks liefert keine Antworten auf die damit zusammenhängenden Fragen und kann sogar zu einer unsinnigen Beeinflussung von Konsumenten und zur Beeinträchtigung der Exportchancen insbesondere armer Entwicklungsländer führen. Ferner enthält das Konzept des Wasser-Fußabdrucks keine ausreichende „Bewertung der Produktions- und Erzeugungsbedingungen“, sodass sich das

Umweltbundesamt bisher zurückhält, „eine klare Position zum water footprint abzugeben“ (Markard, 2009).

Auch bei Fragen einer zweckmäßigen und nachhaltigen Landnutzung, eines guten Wassermanagements, der Vermeidung von Wasserverschwendung und allgemein bei Fragen der nachhaltigen Nutzung der Ressource Wasser ist das jetzige Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdrucks kaum hilfreich. Die Einteilung in den Grünen und Blauen Wasser-Fußabdruck ist dabei nicht ausreichend, da auch das Blaue Wasser einen Anteil haben kann, der als erneuerbare Ressource für eine nachhaltige Nutzung zur Verfügung stehen kann.

5.2 MODIFIZIERTES KONZEPT ALS ERGÄNZUNG UND ERWEITERUNG DES BISHERIGEN KONZEPTS

Aus diesen Gründen wird vorgeschlagen, das Konzept des Virtuellen Wassers zu ergänzen und wie folgt zu modifizieren: Als Virtuelles Wasser wird nur der Anteil des zur Herstellung von Produkten oder zur Erbringung von Dienstleistungen benötigten Wassers gezählt, das am Ort der Produktion oder der Erbringung von Leistungen nicht nachhaltig entnommen oder über ein bestimmtes Maß hinaus verschmutzt wird. Das für das Produkt oder für die Dienstleistung am Ort nachhaltig genutzte Wasser bleibt bei dieser Betrachtung unberücksichtigt. Es handelt sich also bei dem modifizierten Konzept um den nicht nachhaltig genutzten Anteil des Virtuellen Wassers, der im Folgenden auch als nicht nachhaltiges Virtuelles Wasser bzw. nicht nachhaltiger Wasser-Fußabdruck bezeichnet wird. Die Hauptschwierigkeit dieses Konzepts liegt in der Quantifizierung der nachhaltigen Wassernutzung, die nicht nur mit einem einzigen Indikator festgelegt werden kann (Hoekstra und Chapagain, 2008). Ausführliche Darstellungen über die nachhaltige Wasserwirtschaft zeigen (Kahlenborn und Kraemer, 1999), dass viele Gesichtspunkte zu beachten und noch eine Fülle von Forschungsfragen offen sind. Dennoch soll hier versucht werden, durch einzelne Schritte dem Ziel näher zu kommen. Die Wasserverschmutzung wird zunächst ausgeklammert.

Das in der Landwirtschaft genutzte Grüne Wasser, das durch Evapotranspiration verbraucht wird, soll als nachhaltig genutzt angesehen werden und bleibt daher unberücksichtigt. Auch das Blaue Wasser in einem produzierenden Bilanzraum (beispielsweise eine Landwirtschaft, ein Unternehmen, ein Gewerbe, eine Region oder eine Nation) kann nachhaltig genutzt werden. In diesem Fall verschwindet der nicht nachhaltige Wasser-Fußab-

druck. Beim Handel mit so produzierten Gütern bleibt also der Virtuelle Wasserstrom außer Betracht, da kein nicht nachhaltiger Virtueller Wasserstrom vorhanden ist. Anschaulich kann das etwa bedeuten, dass beim Trinken einer Tasse Kaffee der Konsument im Erzeugerland zwar 140 Liter Wasser (vgl. Tabelle 1) nutzt, welches jedoch ohne Kaffeeplantage aus der Region abfließen oder durch eine von Menschen nicht genutzte Vegetation verbraucht würde. Ein virtueller Wasserstrom wird nach diesem Ansatz wegen des nachhaltigen Anbaus und einer ebenfalls unterstellten nachhaltigen Verarbeitung nicht berücksichtigt. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Feststellung, dass dem Erzeugerland in diesem Fall infolge einer internen oder externen Nutzung seiner Ressource Wasser kein Nachteil entsteht, sondern es wird im Gegenteil durch die Herstellung des Kaffees und einen eventuellen Export ein Gewinn erzielt.

Eine Grundvoraussetzung für die hier zugrunde gelegte nachhaltige Wasserwirtschaft ist, dass im langjährigen Mittel dem Bilanzraum nicht mehr Wasser durch Verdunstung und Abfluss entzogen werden darf als durch Zufluss und Niederschlag zugeführt wird. Dies bedeutet, dass die im Bilanzraum gespeicherte Wassermenge im langjährigen Mittel konstant bleiben muss, also sich beispielsweise der Grundwasserspiegel mit der Zeit nicht absenken darf. Eine ausreichende Abflussmenge muss gewährleistet werden, damit unerwünschte Inhaltsstoffe im Wasser nicht über festzusetzende Grenzwerte angereichert werden. Ist die genannte Grundvoraussetzung nicht erfüllt, so liegt kein nachhaltiger Umgang mit der Ressource Wasser vor. In diesem Fall ist das verdunstete Blaue Wasser wie im bisherigen Konzept als Virtuelles Wasser bzw. als nicht nachhaltiges Virtuelles Wasser zu berücksichtigen.

Schwieriger ist die Berücksichtigung einer Verschmutzung des Wassers. Als Schmutz werden hier alle Stoffeinträge in das Wasser angesehen, die für eine spätere Wassernutzung unerwünscht sind. Für den Bereich der Landwirtschaft hat Hoekstra (vgl. Hoekstra und Chapagain, 2008) den in Kapitel 3.3 erläuterten Grauen Wasser-Fußabdruck bzw. das Graue Virtuelle Wasser als Maß für den Verschmutzungsgrad vorgeschlagen. Der Graue Wasseranteil ist im Allgemeinen eine fiktive Größe, die das gedachte Wasservolumen angibt, welches zur Verdünnung der Verschmutzung auf ein festgelegtes Maß nötig ist. Trotz der in Kapitel 3.3 diskutierten Problematik soll diese Definition für das hier modifizierte Konzept übernommen werden, sofern nur der Bereich der Landwirtschaft betrachtet wird. Für das zur industriellen oder gewerblichen Herstellung von Gütern benötigte

Wasser, das verschmutzt wird, sind andere Kriterien nötig, wie in Kapitel 3.3 erläutert wurde. Entsprechendes gilt für den Bereich der Dienstleistungen. Letztlich ist der Aufwand zur hinreichenden Klärung des verschmutzten Wassers zu quantifizieren. Dieses Thema, das noch eine Vielzahl weiterer Überlegungen erfordert, wird hier nicht vertieft, zumal der Schwerpunkt dieser Arbeit auf landwirtschaftlichen Erzeugnissen liegt, die den überwiegenden Teil des Virtuellen Wasserbedarfs ausmachen.

Eine Auswertung der verfügbaren Daten zum virtuellen Wasser bzw. zum Wasser-Fußabdruck von Ernteprodukten zeigt, dass es zwar eine Fülle von Daten über das Grüne, Blaue und im jüngeren Schrifttum auch Graue Virtuelle Wasser gibt, es liegen jedoch keine Angaben über die Höhe des nicht nachhaltigen Blauen Virtuellen Wasservolumens vor. Der Autor schlägt vor, diese Daten zu erheben bzw. zu ergänzen. In einem ersten Schritt kann beispielsweise mittels einer Wasserbilanz für die betrachtete Region geprüft werden, ob im langjährigen Mittel die in der Region gespeicherte Wassermenge konstant bleibt (Nachhaltigkeit möglich) oder fällt (Wasserstress, kein nachhaltiges Wassermanagement vorhanden). Mitunter sind die Regionen mit Wasserstress bekannt (vgl. Böler und Strobel, 2009). Ist eine Region identifiziert, der im Mittel mehr Wasser durch Verdunstung und Abfluss entzogen wird als durch Niederschlag und Zufluss zugeführt wird, dann zählt der verdunstete Anteil des gesamten zur Bewässerung eingesetzten Blauen Wassers als nicht nachhaltiges Virtuelles Wasser. Eine zusätzliche Angabe des Grauen Wassers in der Definition von Hoekstra (Kapitel 3.3) kann sinnvoll sein, um den Grad der Wasserverschmutzung in der Landwirtschaft durch Dünge- und Pflanzenschutzmittel zu charakterisieren. Eine Addition der beiden Wasserarten ist problematisch (vgl. Kapitel 3.3) und wird hier nicht empfohlen, da das verdunstete Blaue Wasser real eingesetzt werden muss, das Graue Wasser nach Hoekstra jedoch nur eine fiktive Größe ist, die tatsächlich nicht dem betrachteten Bilanzraum zugeführt wird und damit auch kein Teil der Wasserbilanz sein kann.

Da keine verlässlichen Daten über den Anteil des Blauen Wassers, das nachhaltig entnommen wird, zur Verfügung stehen, wird zur Veranschaulichung des modifizierten Konzepts die folgende einfache Abschätzung vorgenommen: Nach den in Kapitel 4.2 genannten Zahlenwerten für den globalen Wasser-Fußabdruck landwirtschaftlicher Ernteprodukte entsprechend der jüngsten Literatur (Mekonnen und Hoekstra, 2010a) beträgt der Grüne Wasser-Fußabdruck $WF_g = 5.800 \text{ km}^3/\text{a}$ und der Blaue Wasser-Fußabdruck $WF_b = 900 \text{ km}^3/\text{a}$. Nimmt man

an, dass etwas mehr als 50 % des Blauen Wassers, also rund 500 km³/a, nicht nachhaltig entnommen wurden, so wäre dieser Betrag der globale, nicht nachhaltige Virtuelle Wasser-Fußabdruck. Bezogen auf den gesamten Wasser-Fußabdruck (6.700 km³/a, der Graue Anteil sollte aus den zuvor genannten Gründen nicht hinzugerechnet werden) entspricht dies rund 7 %, also weniger als 10 % des gesamten Wasser-Fußabdrucks.

Für die globale landwirtschaftliche Tierproduktion sind ohne Berücksichtigung des Grauen Wasseranteils kürzlich folgende, hier gerundete Daten publiziert worden (Mekonnen und Hoekstra, 2010b): $WF_g = 2.100 \text{ km}^3/\text{a}$, $WF_b = 150 \text{ km}^3/\text{a}$. Mit der oben genannten Annahme wären rund 80 km³/a des Blauen Wasser-Fußabdrucks aus nicht nachhaltiger Entnahme, also ca. 4 % des gesamten Wasser-Fußabdrucks für die globale Tierproduktion in der Landwirtschaft.

Berücksichtigt man ferner, dass der Blaue Wasser-Fußabdruck (6 %, Liu et al., 2009) der weltweit gehandelten landwirtschaftlichen Rohprodukte im Vergleich zum Blauen Wasser-Fußabdruck (13 %) der global erzeugten Agrar-Rohprodukte nur etwa halb so groß ist, wird der relativ kleine Anteil des Blauen Wassers an der Produktion der exportierten Agrarprodukte deutlich. Die in Klammern gesetzten Prozentwerte geben jeweils den Anteil des Blauen zum gesamten Wasser-Fußabdruck an. Mit der genannten groben Schätzung des Anteils des nicht nachhaltigen Wasser-Fußabdrucks erhält man rund 200 km³/a (ca. 3 % des gesamten Wasser-Fußabdrucks) als nicht nachhaltigen Wasser-Fußabdruck für international gehandelte Agrar-Rohprodukte.

Die sehr groben Schätzwerte sollten mit Hilfe von Erhebungen des nicht nachhaltigen Blauen Wasseranteils bei der Produktion von Gütern oder der Erbringung von Dienstleistungen durch belastbare Daten ersetzt sowie durch geeignete Kennwerte zur Charakterisierung der Wasserverschmutzung infolge der jeweiligen Nutzung ergänzt werden. Dennoch relativieren die hier nur grob geschätzten Zahlenwerte die publizierten Daten über den sehr hohen anthropogenen „Wasserverbrauch“ bzw. den persönlichen Wasser-Fußabdruck von einigen tausend Litern Wasser pro Tag. Das Grüne und teilweise das Blaue Wasser würden auch ohne Beeinflussung des Menschen für die natürliche Pflanzen- und Tierwelt benötigt und sind Teil des globalen Wasserkreislaufs der Erde. Der mit dem bisherigen Konzept des Virtuellen Wassers vielfach verknüpfte Hinweis, dass wir dem Wassermangel in anderen Ländern entgegen wirken können oder der Vorwurf, dass wir die Wasserressourcen anderer Länder aus-

beuten (Kapitel 4.2), sind zu vereinfachte Darstellungen. Das hier vorgeschlagene modifizierte Konzept berücksichtigt nur die Wassermengen, die nicht nachhaltig dem betrachteten Bilanzraum entnommen oder verschmutzt werden. Damit reduziert sich der Virtuelle „Wasserverbrauch“ vermutlich um mehr als den Faktor 10 und beschränkt sich auf diejenige Wassermenge, die verringert werden muss, um zukünftig einen zunehmenden Wassermangel vermeiden zu können.

Der hier grob geschätzte, globale, nicht nachhaltige Wasser-Fußabdruck in Höhe von 500 km³/a bzw. 200 km³/a für Agrar-Rohprodukte ist zwar klein gegenüber dem gesamten Wasser-Fußabdruck, es handelt sich dennoch um sehr große Wassermengen, die das zehnfache bzw. vierfache des Wasservolumens des Bodensees ausmachen. Die vorgenommene Reduzierung des für die Landwirtschaft benötigten Wassers auf den besonders kritischen Wasseranteil dient dazu, gezielter als bisher möglich auf die Wasserproblematik hinzuweisen. Zeitlich und örtlich ist Wasser ein knappes Gut. Viele Landflächen leiden bereits heute unter einer großen Wasserknappheit oder sind vom Wassernotstand bedroht (Hahn, 2009). Wenn nicht gehandelt wird, verschlimmert sich die Wasserverfügbarkeit und kann zu katastrophalen Auswirkungen auf die Landschaft und für die Menschen führen (Giese et al., 1998). Das vorgeschlagene Konzept soll in einem ersten Schritt helfen, dieser Entwicklung dadurch entgegenzuwirken, dass zunächst dokumentiert wird, in welchen Bereichen und Regionen Güter hergestellt werden, zu deren Produktion im langjährigen Mittel mehr Wasser benötigt wird als verfügbar ist, also mit der Ressource Wasser nicht nachhaltig umgegangen wird.

Das modifizierte Konzept ergänzt und erweitert das bisherige und hat folgende zwei Hauptvorteile:

1. Die Produzenten und die produzierenden Regionen erfahren, ob und gegebenenfalls wie viel Wasser sie nicht nachhaltig Ihrem Bilanzraum zur Herstellung von Produkten entnehmen und erhalten Hinweise über die von ihnen verursachte Wasserverschmutzung.
2. Die Konsumenten und die importierenden Regionen erfahren, bei welchen Produkten zur Erzeugung auf nicht nachhaltige Wasserressourcen zurückgegriffen wird und wie hoch dieser Wasserbedarf ist.

Die beiden Hauptvorteile unterstreichen, dass das modifizierte Konzept sowohl für die Produzenten als auch für die Konsumenten

ten die Bereiche, Regionen und Güter identifiziert, bei denen eine Übernutzung der Ressource Wasser stattfindet und quantifiziert diese Übernutzung.

5.3 DAS MODIFIZIERTE KONZEPT ALS INFORMATIONSSQUELLE FÜR EIN NACHHALTIGES WASSER-MANAGEMENT

Setzt man voraus, dass alle Daten sorgfältig erhoben wurden und belastbar sind, so liefert das modifizierte Konzept lediglich Informationen und noch keine Handlungsanweisungen. Die Frage, ob und inwieweit diese Informationen auch dazu führen, mit der Ressource Wasser schonender umzugehen, ist damit also noch nicht beantwortet. Weitgestreute Informationen bis zu den Konsumenten können jedoch eine Handlungsweise in Richtung einer nachhaltigen Wasserwirtschaft unterstützen und auf alle Marktteilnehmer einen zumindest geringen Druck ausüben. Effektiver wären sicherlich kostendeckende Wasserpreise für alle Abnehmer, also auch für die Landwirtschaft in allen Ländern der Erde, um Wasser sparsam zu nutzen. Seit Jahrzehnten wird dieses Problem diskutiert (vgl. Hoekstra und Chapagain, 2008), eine international akzeptierte Lösung ist bisher nicht in Sicht.

Ein anderer Weg, dieser Herausforderung zu begegnen, ist das Konzept des Integrierten Wasserressourcen-Managements (IWRM – Integrated Water Resources Management), wie es vom „Technical Committee of the Global Water Partnership (GWP)“ vorgestellt wurde (vgl. Rahaman und Varis, 2005). IWRM ist ein interdisziplinärer Managementansatz für Herausforderungen im Bereich des Wassers mit dem Ziel, unter Beteiligung aller betroffenen Stellen und einflussnehmenden Gruppen Maßnahmen einer nachhaltigen Wasserwirtschaft zu fördern. Dabei wird die Ressource Wasser im Zusammenhang mit dem gesamten Ökosystem betrachtet. Die mit Wasserfragen beschäftigten Organisationen der Vereinten Nationen sowie weitere Organisationen forschen auf dem Gebiet des IWRM. Die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) berät national und international auf diesem Gebiet. Das Integrierte Wasserressourcen-Management (IWRM) ist ein Leitbild, das vor allem Entwicklungsländern mit Wasserknappheit helfen kann, einen zu hohen Wasserverbrauch oder eine übermäßige Wasserverschmutzung zu vermeiden. Das Konzept des Virtuellen Wassers liefert hierzu keinen ausreichenden Beitrag. In einigen Fällen sind sogar nachteilige Entwicklungen zu erwarten, wie aus der begründeten Schlussfolgerung einer umfangreichen Studie hervorgeht: „*Virtueller Wasserhandel für arme, wasserknappe Agrarländer*

aus der Gruppe der klassischen Entwicklungsländer ist nicht realisierbar und auch nicht wünschenswert“ (Horlemann und Neubert, 2006).

Das hier vorgeschlagene Konzept des nicht nachhaltigen Virtuellen Wassers kann dabei helfen, die Regionen mit derzeit zu hoher Wasserentnahme zu identifizieren sowie den Verbrauch und die Verschmutzung des Wassers zu quantifizieren. Der Autor schließt sich der folgenden Bewertung des Bundesumweltamtes an (Markard, 2009): „*Wichtig ist aus unserer Sicht, nicht eine schlichte Senkung des Virtuellen Wasserverbrauchs an sich zu fordern, sondern vielmehr darauf zu achten, dass die Einsparungen dort erfolgen, wo ein hoher Wasserverbrauch die größten negativen Folgen für Mensch und Natur hat*“. Ergänzend sei vermerkt, dass in armen Ländern, die unter Wassermangel leiden, das Potential für wassersparende Maßnahmen besonders hoch ist, da ein brauchbares Wassermanagement in der Regel nicht existiert. Armut und nicht ausreichend wirksame Kontrollen schaden der Umwelt vielfach am meisten. Unterstützung durch reiche Länder und interessierte Unternehmen ist daher erforderlich.

Ein nachhaltiges Wassermanagement in der Landwirtschaft setzt im Allgemeinen eine nachhaltige Landwirtschaft voraus. Die Unternehmen der Ernährungsindustrie sind auf Agrar-Rohprodukte hoher Qualität angewiesen, die ohne Wasser guter Qualität und ohne das Prinzip der Nachhaltigkeit nicht dauerhaft erreicht werden können (vgl. Schubert, 2007). Es wurde daher die Plattform „Initiative Nachhaltige Landwirtschaft“ (Sustainable Agriculture Initiative, SAI) aufgebaut (Jöhr, 2003), die von den drei größten europäischen Unternehmen der Lebensmittelindustrie gegründet wurde und inzwischen 18 weitere Unternehmen als Mitglieder hat (SAI Platform, 2007). Die global agierenden Unternehmen der Ernährungsindustrie haben die Bedeutung einer nachhaltigen Versorgung der Landwirtschaft mit Wasser für die Sicherung hochwertiger Agrarrohprodukte erkannt. Ein gut geführtes Wassermanagement und der nachhaltige Umgang mit Wasser gehören daher zu den höchsten Prioritäten des größten Unternehmens der Ernährungsindustrie (Nestlé, 2007). Die Versorgung mit Wasser von ausreichender Qualität ist der Schlüssel für die Ernährung der Menschen und wird zunehmend ein limitierender Faktor für die Bereitstellung der Agrarrohprodukte (Schubert, 2007). Abhängig von Zeit und Ort ist Wasser vielfach ein knappes Gut. Derzeit haben etwa eine Milliarde Menschen keinen Zugang zu gesundheitlich unbedenklichem Trinkwasser und mehr als ein Drittel der Menschheit verfügt

nicht über die sanitären Grundeinrichtungen (UNDP, 2005). Neben der Bereitstellung von Energie unterstreichen die Daten, dass die Versorgung mit Wasser zufriedenstellender Qualität zu den größten globalen Herausforderungen gehört.

5.4 ANWENDUNG DES MODIFIZIERTEN KONZEPTS AUF DIE REGION BERLIN-BRANDENBURG

Die folgenden Ausführungen beziehen sich nur auf den Bereich der Landwirtschaft, der global – wie bereits ausgeführt – rund 70 % des Virtuellen Wassers ausmacht. Wie bereits im Kapitel 4.3.2 ausgeführt wurde, hat in der Region Berlin-Brandenburg die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen derzeit keine Bedeutung (Lischeid, 2010). Die Evapotranspiration von Blauem Wasser, das zur Bewässerung eingesetzt wird, ist also vernachlässigbar klein gegenüber der gesamten Evapotranspiration. Selbst wenn diese kleine Menge zu berücksichtigen wäre, ist davon auszugehen, dass Blaues Wasser für die jetzige landwirtschaftliche Feldbewässerung aus nachhaltiger Nutzung stammt, zumal kostendeckende Wasserpreise zu erheben sind. Da das aus dem Niederschlag stammende, erneuerbare Grüne Wasser der nachhaltigen Nutzung zugeordnet wird (vgl. Kapitel 5.2) und die sehr geringe Menge des Bewässerungswassers die nachhaltige Wasserwirtschaft der Fokusregion nicht beeinflusst, ist also für die Region Berlin-Brandenburg kein nicht nachhaltiges Virtuelles Wasser im Bereich der Landwirtschaft vorhanden. Entsprechend ist auch der nicht nachhaltige Wasser-Fußabdruck gleich Null. Zur Veranschaulichung sei folgender Vergleich herangezogen: Gäbe es in der Region überhaupt keine Landwirtschaft, wäre dennoch eine Vegetation vorhanden, die vermutlich keine geringere, möglicherweise sogar eine größere Evapotranspiration als derzeit zur Folge hätte.

Bisher wurde eine Wasserverschmutzung durch die Landwirtschaft infolge einer nicht optimalen Düngung oder durch Pflanzenschutzmittel nicht berücksichtigt. Wasserverunreinigungen können die nachhaltige Wassernutzung erheblichen beeinflussen. Erhebungen des Grauen Wassers nach der Definition von Hoekstra (vgl. Kapitel 3.3) für den Bereich der Landwirtschaft in der Region Berlin-Brandenburg sind dem Autor nicht bekannt. Daher kann dieser Gesichtspunkt hier nicht vertieft werden.

Auch wenn kein Wasser-Fußabdruck für Agrarrohprodukte der Fokusregion vorhanden ist, sofern nach dem modifizierten Konzept nur die nicht nachhaltige Wassernutzung zugrunde gelegt wird, so sei dennoch auf einige Herausforderungen hingewie-

sen. Da die Region Berlin-Brandenburg im Vergleich zu allen anderen Ländern Deutschlands die geringsten Niederschläge hat, ergeben sich insbesondere in trockenen Jahren Probleme durch nicht ausreichendes Grünes Wasser verbunden mit Ernteaussfällen. Durch Klimaänderungen können sich diese Probleme verschärfen, wie im folgenden Kapitel noch erläutert wird. Es sind daher die bisherigen Anstrengungen fortzusetzen oder sogar zu verstärken, um auch zukünftig eine nachhaltige Versorgung der Fokusregion mit ausreichend Wasser hoher Qualität zu ermöglichen.

6. GLOBALER WANDEL UND VIRTUELLES WASSER

6.1 KONSEQUENZEN UND EMPFEHLUNGEN AUS GLOBALER SICHT

Virtuelles Wasser wird hauptsächlich für landwirtschaftliche Erzeugnisse, für industriell und gewerblich hergestellte Produkte sowie für die Bereitstellung von elektrischem Strom benötigt. Virtuelles Wasser zur Erbringung von Dienstleistungen wird zwar in der Fachliteratur vielfach erwähnt, aber nicht ausreichend behandelt (vgl. Kapitel 2.2). Es bleibt daher auch im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt. Der Virtuelle Wassergehalt von industriell und gewerblich hergestellten Produkten lässt sich durch eine moderne Produktionsweise mit einem geeigneten Wassermanagement verbunden mit einer Wasser-Kreislaufführung und Wasseraufbereitung gering halten. Als Verbrauch zählt nur die verdunstete, verdampfte und sublimierte Wassermenge, zu berücksichtigen ist jedoch die Wasserverunreinigung (Kapitel 2.2). Die größte Virtuelle Wassermenge fällt zur Erzeugung von Agrarprodukten an, aus denen Lebensmittel hergestellt werden. Das hier behandelte Thema wird daher am Beispiel des Virtuellen Wassers zur Erzeugung von Lebensmittel-Rohstoffen pflanzlichen und tierischen Ursprungs diskutiert.

Auch wenn in vielen Regionen der Erde Lebensmittel knapp sind und weltweit 800 Millionen Menschen an Hunger leiden und jährlich 35 Millionen daran sterben (Leitzmann, 2001), besteht aus globaler Sicht derzeit kein Mangel an Lebensmittel-Rohstoffen, sondern ein Verteilungsproblem bzw. ein Problem der Armut in vielen Entwicklungsländern (vgl. Schubert, 2007). Die hohen und häufig vermeidbaren Nachernteverluste in vielen Entwicklungsländern und der unnötige Verderb sowie die hohe Wegwerfquote von Lebensmitteln sind noch ein Potential, das zumindest teilweise ausgeschöpft werden könnte. Dennoch deutet vieles darauf hin, dass man zukünftig nicht mehr von einem globalen Überschuss von Agrarrohstoffen ausgehen kann. Hierfür sprechen folgende Fakten und Argumente:

Die Bevölkerung der Erde wächst weiterhin von heute über 6,5 Milliarden auf etwa 8 Milliarden Menschen im Jahr 2025 (UN, 2007), während die nutzbare, also mit Wasser versorgte landwirtschaftliche Fläche abnimmt. Nach Hopp (2002) waren im Jahr 1950 noch 0,51 ha pro Kopf verfügbar, 1975 waren es 0,37 ha/Kopf und im Jahr 2025 werden pro Einwohner nur noch 0,15 ha landwirtschaftliche Fläche nutzbar sein. Trotz einer fortlaufend verbesserten Effizienz der Agrarproduktion ist es fraglich, ob die kleiner werdende nutzbare Landfläche ausreicht, die Gesamtbevölkerung zukünftig ausreichend mit Nahrungs-

mitteln zu versorgen. Limitierender Faktor für die Nutzbarkeit der Landfläche ist das nachhaltig verfügbare Wasser.

Westliche Ernährungsgewohnheiten mit hohem Fleischkonsum werden zunehmend von den aufstrebenden, bevölkerungsreichen Ländern wie China und Indien angenommen. Gegenüber einer vegetarischen Kost benötigt eine Mischkost mit 20 % Fleischanteil eine um den Faktor zwei bis drei größere Menge an Virtuellem Wasser (Kapitel 4.2) bzw. an nutzbarer Landfläche, hauptsächlich für den Anbau von Futtergetreide.

Lebensmittel-Rohstoffe konkurrieren zunehmend mit nachwachsenden Rohstoffen insbesondere in Form von Energiepflanzen als Ersatz für fossile Brennstoffe. Bereits heute wird in Brasilien ein Viertel des Kraftstoffs für Fahrzeuge durch Bioethanol aus Zuckerrohr ersetzt (FNR, 2006a). 13 % der Agrarfläche in Deutschland wird für nachwachsende Rohstoffe genutzt (FNR, 2006b), nach Hochrechnungen wird sich dieser Anteil bis zum Jahr 2030 verdoppelt haben (FNR, 2007). Die Gefahr einer zukünftig nicht mehr ausreichenden Versorgung mit Lebensmitteln wird bereits gesehen (Schaub und Vetter, 2007).

Zuverlässige Vorhersagen, in welcher Weise sich der Klimawandel auf die globale Erzeugung von Lebensmittel-Rohstoffen auswirkt, sind auf der Basis der verfügbaren Daten nicht möglich. Für die Fokusregion Berlin-Brandenburg kann angenommen werden, dass sich der Klimawandel eher nachteilig als vorteilhaft auf die Landwirtschaft auswirken wird, sofern man nach den gängigen Vorhersagen annimmt, dass Extremereignisse wie Hochwasser und längere Trockenperioden zunehmen und die Niederschläge in der Vegetationsperiode abnehmen werden.

Insgesamt weisen die zusammengestellten Fakten und voraussichtlichen Entwicklungen darauf hin, dass sich die Periode der globalen Agrarüberschüsse dem Ende neigt und zukünftig damit zu rechnen ist, dass Lebensmittel knapp und damit teurer werden, sofern keine wirksamen Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Limitierender Faktor ist das für die landwirtschaftliche Erzeugung von Lebensmittel-Rohprodukten benötigte Wasser. Landwirtschaft kann langfristig nur erfolgreich sein, wenn das Prinzip der Nachhaltigkeit beachtet wird. Dieses Prinzip gilt in besonderer Weise für das benötigte Wasser. Das hier vorgeschlagene Konzept des nicht nachhaltigen Virtuellen Wassers wird helfen, das für die Bereitstellung von Gütern nicht nachhaltig entnommene Wasser zu identifizieren und zu quantifizieren. Es wird daher empfohlen, die Daten für das modifizierte Konzept

des Virtuellen Wassers zu erheben, also das für die einzelnen Produkte genutzte, nicht nachhaltig entnommene Wasser in den wichtigen Regionen und Nationen zu erheben.

Wirtschaftliche Zwänge in armen Ländern, fehlende oder nicht ausreichende Kontrollen sowie weitere Gründe werden auch in Zukunft dazu führen, dass die Ressource Wasser zur Herstellung von Produkten übernutzt wird. Kommen noch Notlagen wie eine Lebensmittelknappheit hinzu, wird das Prinzip der Nachhaltigkeit zunehmend verletzt werden, um über eine Bewässerung Agrarrohstoffe erzeugen zu können, auch wenn dazu mehr Wasser verbraucht wird als durch Niederschlag und Zufluss geliefert werden kann. Kurzfristig wird eine derartige Entwicklung zu tolerieren sein, langfristig jedoch nicht, wie die in Kapitel 3.3 genannten Beispiele zeigen.

Eine Vielzahl von Gegenmaßnahmen sind möglich, um für eine Region oder allgemein für einen Bilanzraum Bedingungen für eine nachhaltige Wasserwirtschaft erreichen zu können. Für die Erzeugung von Agrarrohstoffen zählen hierzu besonders die Verringerung der Verdunstung, die Verbesserung der Wasserspeicherung und die Verringerung des Abflusses von Wasser aus dem Bilanzraum, sofern nicht bereits der notwendige Mindestabfluss erreicht ist. Die Verdunstung bzw. die Evapotranspiration kann auf vielfache Weise wie Art der Bewässerung, Anbau unter Glas oder Folie, Pflanzenart und Bodenbearbeitung beeinflusst werden. Die Züchtung neuartiger Pflanzen mit dem Ziel einer geringeren Evapotranspiration wäre eventuell auch eine Option. Eine gute Wasserspeicherung sorgt dafür, dass zu Zeiten hohen Niederschlags nicht mehr als nötig aus der Region abfließt und dann während der Trockenperioden zur Verfügung steht. Das in Kapitel 5.3 genannte Konzept des Integrierten Wasserressourcen-Managements (IWRM) ist ein möglicher Weg, wirkungsvolle Gegenmaßnahmen insbesondere in Entwicklungsländern zu organisieren und zu koordinieren.

Neben der Wasserspeicherung sollten auch Lebensmittel-Rohstoffe sowohl regional als auch global gelagert werden, um zeitlich unterschiedliche Ernteerträge und starke Preisschwankungen ausgleichen zu können sowie für Notsituationen vorbereitet zu sein. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben wurde, entspricht allein die globale Lagerung von Getreide einer Virtuellen Wassermenge von 500 km³. Es wurde bereits vorgeschlagen, Lebensmittel-Rohstoffe zu lagern anstatt Wasser zu speichern (Renault, 2003). Zu bedenken sind allerdings die mitunter hohen Lagerverluste der Nahrungsmittel insbesondere durch Schädlinge und Verderb.

Ein sehr wirkungsvoller Weg zur Versorgung der Menschheit mit ausreichend Lebensmittel-Rohstoffen unter Verzicht auf eine nicht nachhaltige Wassernutzung wäre eine erhebliche Einschränkung des Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen, insbesondere von Energiepflanzen, zugunsten des Anbaus von Pflanzen für die menschliche Ernährung. Die Nutzung von Abfällen aus der landwirtschaftlichen Erzeugung von Rohstoffen sowie aus der Lebensmittelproduktion für die Gewinnung geeigneter Energieträger ist ein unterstützenswerter Weg, der Anbau von Energiepflanzen als Alternative zum Anbau von Pflanzen zur Herstellung von Lebensmitteln sollte jedoch angesichts der hier zusammengestellten Fakten und Argumente überdacht und zumindest nicht subventioniert werden.

Die in Kapitel 5.3 diskutierte Erhebung eines kostendeckenden Wasserpreises wäre ein guter Anreiz, sparsam mit knappen Wasserressourcen umzugehen. Wie bereits genannt, ist die globale Umsetzung eines derartigen Konzepts für den Bereich der Landwirtschaft derzeit nicht in Sicht.

6.2 KONSEQUENZEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE REGION BERLIN-BRANDENBURG

Nach verschiedenen Regionalmodellen geht man davon aus, dass in der Fokusregion zukünftig die Temperatur deutlich ansteigen wird und – mit einigen Unsicherheiten behaftet – voraussichtlich im Sommer mit geringeren und im Winter mit höheren Niederschlägen zu rechnen ist (vgl. Lischeid, 2010). Die Ressource Wasser könnte also zumindest während der Sommermonate zunehmend ein knappes Gut werden, auch wenn bisher nicht zuverlässig vorhergesagt werden kann, wie sich ein Klimawandel auf die gesamte Verdunstung bzw. die Evapotranspiration in der Fokusregion auswirken wird (Köstner und Kuhnert, 2011). Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Landschaftswasserhaushalt und die Wasserbilanzen in der Region Berlin-Brandenburg sowie die Diskussion von Anpassungsmaßnahmen und Herausforderungen beim nachhaltigen Umgang mit Wasser in der Landschaft wurden kürzlich ausführlich von Lischeid (2010) und Grünewald (2010) zusammengestellt.

Im Hinblick auf das Virtuelle Wasser ist nicht auszuschließen, dass die heute in der Region unbedeutende künstliche Bewässerung in der Landwirtschaft zunehmen könnte. Dies würde bedeuten, dass insgesamt mehr Wasser verdunstet, also der Region entzogen wird. Es ist daher zukünftig zu prüfen, inwieweit das für die Bewässerung notwendige Wasser nachhaltig der

Region entnommen wird oder nicht. Wird mehr Wasser entzogen als nachhaltig zugeführt wird, ist das hier vorgeschlagene Konzept des nicht nachhaltigen Virtuellen Wassers sinnvoll und zweckmäßig. Die für die Anwendung des modifizierten Konzepts erforderlichen Daten sollten für die Region Berlin-Brandenburg rechtzeitig erhoben werden.

Angesichts der in Kapitel 6.1 zusammengestellten Fakten und Argumente ist jedoch zu erwarten, dass sich in den nächsten Dekaden der insgesamt einstellende globale Wandel stärker auf die Landwirtschaft in der Region Berlin-Brandenburg auswirken wird als ein regionaler Klimawandel. Geht man von der prognostizierten globalen Knappheit von Lebensmitteln und damit von Agrarrohstoffen infolge der in vielen Regionen der Welt beobachteten Wasserknappheit aus, dann ergeben sich folgende Tendenzen und Empfehlungen:

Die Preise für Agrarrohprodukte werden steigen, die Erzeugung dieser Produkte auch in der Fokusregion ist trotz der geringen Niederschläge im Vergleich zu den anderen Ländern Deutschlands notwendig und wird an Bedeutung gewinnen.

Ein erheblicher Anbau von Energiepflanzen in der Landwirtschaft sollte im Hinblick auf die zu erwartende globale Knappheit von Lebensmitteln überdacht werden.

Wenn Wasser zunehmend ein knapperes Gut wird, sollten möglichst hochwertige und damit teure Agrargüter angebaut werden, damit die anteiligen Wasserkosten gering bleiben. Wie bereits früher begründet wurde (Schubert, 2007), bietet sich hierzu das Land Brandenburg zur Versorgung der Metropolregion Berlin an.

Die höhere Eigenversorgung zum Beispiel mit frischem Obst und Gemüse verkleinert den Import von Virtuellem Wasser und damit den Wasser-Fußabdruck in anderen Regionen. Es sollte jedoch nach dem hier vorgeschlagenen Konzept nur der Anteil des Virtuellen Wassers berücksichtigt werden, der nicht nachhaltig der exportierenden Region entzogen wird, da nur dieser Anteil dem exportierenden Land schadet. Die hierzu erforderlichen Daten für die Importwaren sind zu erheben.

Die Anstrengungen für eine nachhaltige Wasserwirtschaft in der Region sollten unter Berücksichtigung des globalen Wandels fortgesetzt und die Belastung des Wassers durch die Landwirtschaft infolge der ausgebrachten Dünge- und Pflan-

zenschutzmittel im Auge behalten werden. Aus der Sicht des Virtuellen Wassers bleibt es das Ziel, für die Herstellung von Gütern und zur Erbringung von Dienstleistungen kein Wasser einzusetzen, das nicht nachhaltig der Region entzogen wurde. Neben der Wasserverschmutzung schadet nur dieser Anteil des Virtuellen Wassers der jeweiligen Region und sollte vermieden werden. Das hier vorgeschlagene Konzept identifiziert Produkte, zu deren Herstellung Wasser nicht nachhaltig der Region entzogen wurde und quantifiziert den nicht nachhaltigen Virtuellen Wassergehalt dieser Erzeugnisse.

7. AUSBLICK

Das vorgeschlagene Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des daraus abgeleiteten Wasser-Fußabdrucks ist eine Modifikation und Erweiterung des bestehenden Konzepts. Es berücksichtigt nur denjenigen Anteil des zur Herstellung von Gütern oder zur Erbringung von Dienstleistungen benötigten Wassers, der nicht nachhaltig aus der betrachteten Region oder allgemein einem Bilanzraum entnommen wurde und damit der jeweiligen Region schaden kann. Das für Agrarprodukte überwiegend genutzte Grüne Wasser, das aus dem erneuerbaren Niederschlag stammt, sowie das nachhaltig aus dem Grundwasser oder Gewässern entzogene Blaue Wasser werden nicht in Betracht gezogen. Im hier vorgeschlagenen Konzept wird also nur das Blaue Wasser berücksichtigt, das nicht nachhaltig entnommen wird und damit der jeweiligen Region langfristig schadet.

Die Frage, ob eine nachhaltige Wassernutzung vorliegt, ist nicht immer einfach zu beantworten. In vielen Fällen ist es jedoch einfacher zu entscheiden, ob Wasser nicht nachhaltig genutzt wird. Beispiele hierfür sind die im Schrifttum genannten Fälle einer nachgewiesenen jährlichen erheblichen Absenkung des Grundwasserspiegels in einigen Regionen oder die Austrocknung von Gewässern infolge einer intensiven künstlichen Bewässerung in der Landwirtschaft (vgl. Boßler und Strobel, 2009). Es wird empfohlen, sich in einem ersten Schritt auf die eindeutigen Fälle einer nicht nachhaltigen Wassernutzung in der Landwirtschaft zu beschränken. Rund 70 % des Virtuellen Wassers nach dem bisherigen Konzept beziehen sich auf landwirtschaftliche Erzeugnisse. Eine Beschränkung auf den Bereich der Landwirtschaft ist daher gerechtfertigt.

Für die genannten eindeutigen Fälle sollte es möglich sein, die für das vorgeschlagene Konzept benötigten Daten zu erheben und der Öffentlichkeit bereitzustellen. Die bestehenden internationalen und nationalen Institutionen, die Daten für das bisherige Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdrucks erfolgreich erfassen, bieten alle Voraussetzungen für derartige Erhebungen. Es wäre wünschenswert, wenn sich auch eine Institution aus Deutschland an dieser Datenerfassung beteiligen könnte.

Derartige Daten, die vom bisherigen Konzept des Virtuellen Wassers nicht geliefert werden können, sind sowohl für die Produzenten und exportierenden Länder als auch für die Konsumenten und die importierenden Länder nützlich und hilfreich. Produzenten und exportierende Länder erfahren, ob und gegebenenfalls wie viel Virtuelles Wasser aus nicht nachhaltiger

Nutzung stammen. Sie hätten damit eine tragfähige Basis, um geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten. Die Konsumenten und importierenden Länder bekämen ein faires Datenmaterial, um entscheiden zu können, ob und in welchem Maße sie sich durch den Kauf von Gütern an einer nicht nachhaltigen Wassernutzung in anderen Regionen beteiligen wollen. Insgesamt ist es das Ziel des hier vorgeschlagenen erweiterten Konzepts des Virtuellen Wassers, eine nachvollziehbare Datenbasis bereitzustellen, die zu einer nachhaltigen Nutzung der Ressource Wasser beitragen kann.

Zu beachten ist, dass der Virtuelle Wassergehalt vieler Produkte nach dem hier vorgeschlagenen Konzept vermutlich um mehr als den Faktor 10 kleiner sein dürfte und für eine Reihe von Produkten nahezu vollständig entfallen würde. Die auf diese Weise zur Herstellung von Gütern oder zur Erbringung von Dienstleistungen ermittelten Wassermengen sind mit Sicherheit sehr viel geringer als die bisher angegebenen und damit weniger spekulär. Sie sollten jedoch zumindest als zusätzliche Information bereitgestellt werden, um auch den in Kapitel 4.2 genannten Fehlinterpretationen entgegenzutreten zu können.

Noch nicht ausreichend geklärt ist die Frage der Wasserbeschaffenheit und der Wasserverschmutzung beim Konzept des Virtuellen Wassers bzw. des Wasser-Fußabdrucks. Wie aus der in Kapitel 3.3 genannten Begründung hervorgeht, ist die Einführung des Grauen Virtuellen Wassers nach der Definition von Hoekstra nicht zufriedenstellend. Weitere Überlegungen und Forschungen sind daher erforderlich, um das Gesamtkonzept verbessern zu können mit dem Ziel, die vorhandene Ressource Wasser nachhaltig zu nutzen.

8. ABKÜRZUNGEN UND DIMENSIONEN

a	Jahr
A	Masse des Wasserabflusses aus einem Bilanzraum
E	Evaporation
Einw	Einwohner
ET	Evapotranspiration
ETK	Evapotranspirations-Koeffizient
ha	Hektar (10.000 m ²)
km ³	10 ⁹ m ³
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
N	Masse des Niederschlags in einem Bilanzraum
ΔS	Änderung der gespeicherten Wassermasse in einem Bilanzraum (positiv bei Zunahme der gespeicherten Masse)
T	Transpiration
v	Virtueller Wassergehalt, z. B. angegeben in Liter Wasser/kg Produkt
V	Masse des verdunsteten Wassers aus einem Bilanzraum
v_b	Virtueller Gehalt an Blauem Wasser (Liter Wasser/kg Produkt)
v_g	Virtueller Gehalt an Grünem Wasser (Liter Wasser/kg Produkt)
v_{ges}	gesamter Virtueller Wassergehalt (Liter Wasser/kg Produkt)
v_{grau}	Virtueller Gehalt an Grauem Wasser (Liter Wasser/kg Produkt)
WF	(gesamter) Wasser-Fußabdruck
WF_b	Blauer Wasser-Fußabdruck
WF_g	Grüner Wasser-Fußabdruck
WF_{grau}	Grauer Wasser-Fußabdruck
Z	Masse des Wasserzuflusses in einen Bilanzraum

9. LITERATUR

- Allen, J.A.** (1994): Overall perspectives on countries and regions. Publiziert in: Rogers, P. Lydon, P. (Hrg.): Water in the Arab world - Perspectives and prognoses. Harvard University Press, Cambridge
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, StMUG** (Hrg.) (2009): Virtuelles Wasser – Verstecktes Wasser auf Reisen. Informationen und Poster für die Umweltbildung. StMUG, München
- BBU, regioWASSER**, (Hrg.) (2006): "Virtuelles Wasser" – Woher kommt unser Wasser tatsächlich her? Broschüre des Freiburger Arbeitskreises Wasser im Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz e.V. (BBU) und des regioWASSER e.V., Freiburg
- Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M.** (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Boßler, G., Strobel, S.** (Hrg.) (2009): Wassernotstand. Sitzen wir bald auf dem Trockenen? Herrenalber Forum Band 59, Evangelische Akademie Baden, Karlsruhe, ISBN 978-3-89674-560-6, S.36-55
- Brabeck-Letmathe, P.** (2008): Energie und Wasser. Vortrag an der HWZ Hochschule für Wirtschaft, Zürich, 11.07.2008
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y.** (2010): The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. Value of Water Research Report Series 40, UNESCO-IHE Delft, The Netherlands
- Dehler, G.** (2010): Virtuelle Wasserströme von Industrieprodukten in der Bundesrepublik Deutschland. Bachelorarbeit am Institut für Landwirtschaftsökologie und Ressourcenmanagement (Prof. Dr. H.-G. Frede) der Justus-Liebig-Universität Gießen
- Dietrich, J., Schöninger, M.** (2008): Hydroskript des Lichtweis-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, Kap. 5.5: Verfahren zur Berechnung der Verdunstung; www.hydroskript.de
- Endlicher, W.** (1991): Klima, Wasserhaushalt, Vegetation. Grundlagen der Physischen Geographie II. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- Falkenmark, M.** (1989): The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed? Ambio (Royal Swedish Academy of Sciences), Vol. 18 (2), pages 112-118
- Falkenmark, M.** (2003): Freshwater as shared between society and ecosystems: From divided approaches to integrated challenges. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B 358 (1440), S. 2037-2049
- Falkenmark, M., Widstrand, C.** (1992): Population and water resources: A delicate balance. Population Bulletin 47:3; Population Reference Bureau, Washington D.C.
- Finke, M.** (2008): Die Ökobilanz – eine Komponente der Nachhaltigkeitsbewertung. Naturwissenschaftliche Rundschau 61 (1), S. 21-26, ISSN 0028-1050
- Frede, H.-G.** (2011): Persönliche Mitteilung (Prof. Dr. Hans-Georg Frede, Justus-Liebig-Universität Giessen)
- FNR (Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.)** (Hrg.) (2006a): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, 1. Aufl. FNR, Gülzow
- FNR (Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.)** (Hrg.) (2006b): Pressemitteilung vom 05.09.2006, FNR, Gülzow
- FNR (Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.)** (Hrg.) (2007): Broschüre Bioenergie, FNR, Gülzow
- Fuchs, S.** (2009): Wasser auf die Mühlen. Wasser in der landwirtschaftlichen und industriellen Produktion. Publiziert in: Boßler, G., Strobel, S. (Hrg.) (2009): Wassernotstand. Sitzen wir bald auf dem Trockenen? Herrenalber Forum Band 59, Evangelische Akademie Baden, Karlsruhe, ISBN 978-3-89674-560-6, S.36-55, S. 56-72
- Giese, E., Bahro, G., Betke, D.** (1998): Umweltzerstörungen in Trockengebieten Zentralasiens (West- und Ost-Turkestan). Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen. Franz Steiner Verlag, Stuttgart
- Gleick, P.H.** (2000): The World's Water 2000–2001. Island Press, Covelo, Calif.

Grünewald, U. (2010): Wasserbilanzen der Region Berlin-Brandenburg. Diskussionspapier 7 der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Globaler Wandel – Regionale Entwicklung, www.globalerwandel.bbaw.de

Hahn, H.H. (2009): Sitzen wir bald auf dem Trockenen? Publiziert in: Boßler, G., Strobel, S. (Hrg.) (2009): Wassernotstand. Sitzen wir bald auf dem Trockenen? Herrenalber Forum Band 59, Evangelische Akademie Baden, Karlsruhe, ISBN 978-3-89674-560-6, S.36-55

Hoekstra, A.Y. (Hrg.) (2003a): Virtual water trade. Proceedings of the International Expert Meeting on virtual water trade, Februar 2003, IHE Delft, The Netherlands

Hoekstra, A.Y. (2003b): Virtual water: An introduction. Publiziert in: Hoekstra, A.Y. (Hrg.) (2003): Virtual water trade. Proceedings of the International Expert Meeting on virtual water trade, Februar 2003, IHE Delft, The Netherlands

Hoekstra, A.Y. (2008): The water footprint of food. Publiziert in: Förare, J. (Hrg.): Water for food. The Swedish Research Council for Environment Agriculture Sciences and Spatial Planning (Formas), Stockholm, Schweden, S. 49-60

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K. (2007): Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, Vol. 21, No. 1, S. 35-48

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K. (2008): Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK

Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q. (2002): Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report Series No. 11, IHE Delft, The Netherlands

Hopp, V. (2002): Wasser – Wasserkrise. Bedeutung für Natur, Menschen und Technik. CIT plus, Praxismagazin der Chemie Ingenieur Technik (CIT), 5, Seite 4-9

Horlemann, L., Neubert, S. (2006): Virtueller Wasserhandel – Ein realistisches Konzept zur Lösung der Wasserkrise? Studie des Deutschen Instituts für Entwicklungspolitik, Bonn, ISSN 1860-0468

Jöhr, H. (2003): Lösungsansätze in der global agierenden Lebensmittelwirtschaft. Publiziert in: Girnau, M., Hövelmann, L., Wahmhoff, W., Wolf, W., Wurl, H. (Hrg.) (2003): Nachhaltige Agrar- und Ernährungswirtschaft. Erich Schmidt Verlag, Berlin

Kahlenborn, W., Kraemer, R. A. (1999): Nachhaltige Wasserwirtschaft in Deutschland. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

Köstner, B., Kuhnert, M. (2011): Simulation von Wasserhaushaltskomponenten unter dem Wandel des regionalen Klimas. Publiziert in: Hüttl, R. F., Emmermann, R., Germer, S., Naumann, M., Bens, O. (Hrg.) (2011): Globaler Wandel und regionale Entwicklung, Anpassungsstrategien in der Region Berlin-Brandenburg. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

Lehn, H., Parodi, O. (2009): Wasser – elementare und strategische Ressource des 21. Jahrhunderts. I. Eine Bestandsaufnahme. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 21, S. 272-281; DOI 10.1007/s12302-009-0052-6

Leitzmann, C. (2001): Die globale Ernährungssituation – Welt-ernährung zu Beginn des 21. Jahrhunderts. *Biologie unserer Zeit* 31 (6), S. 408-416

Lemke, P. (2002): Ozeane als Klimaregulatoren. Publiziert in: Parthier, B. (Hrg.): Wasser - essentielle Ressource und Lebensraum. *Nova Acta Leopoldina* NF 85, 323, S. 149-175

Lischeid, G. (2010): Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg. Diskussionspapier 2 (01/2010) der Interdisziplinären Arbeitsgruppe Globaler Wandel – Regionale Entwicklung der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Jägerstr. 22/23, 10117 Berlin

Liu, J., Zehnder, A.J.B., Yang, H. (2009): Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water. *Water Resour. Res.*, 45, W05428, doi: 10.1029/2007WR006051

Lozan, J.L., Graßl, H., Hupfer, P., Menzel, L., Schönwiese C.-D. (Hrg.) (2005): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg

- Markard, C.** (2009): Grußwort zur Herbsttagung "Bund für ökologische Lebensmittelwirtschaft", Berlin, 15. 10. 2009
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y.** (2010a): The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Value of Water Research Series No. 47 UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y.** (2010b): The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products. Value of Water Research Series No. 48 UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y.** (2010c): A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. Value of Water Research Series No. 42 UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands
- Mersmann, A., Kind, M., Stichlmair, J.** (2005): Thermische Verfahrenstechnik, 2. Aufl. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Nestlé (Hrg.)** (2007): Der Nestlé-Bericht zum Wassermanagement. Nestlé S.A., Avenue Nestlé 55, 1800 Vevey, Schweiz
- Peleg, M., Normand, M.D., Horowitz, J., Corradini, M.G.** (2007): An expanded Fermi solution for microbial risk assessment. International Journal of Food Microbiology, Vol. 113. Nr. 1, S. 92-101
- Posten, C., Schaub, G.** (2009): Microalgae and terrestrial biomass as source for fuels. J. Biotechnol., 142, S. 64-69
- Rahaman, M.M., Varis, O.** (2005): Integrated water resources management: Evolution, prospects and future challenges. Sustainability: Science, Practice and Policy 1 (1), pages 15-21
- Renault, D.** (2003): Value of virtual water in food: Principles and virtues. Publiziert in: Hoekstra, A.Y. (Hrg.) (2003): Virtual water trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series 12, UNESCO-IHE Delft, The Netherlands
- Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J., Schaphoff, S.** (2008): Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. Water Resources Research, 44, W09405, doi:10.1029/2007WR006331
- Roth, D., Günther, R., Knoblauch, Michel, H.** (2005): Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. Schriftenreihe „Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen“, Heft 1
- SÄBL,** (2010): Statistische Ämter des Bundes und der Länder: Gebiet und Bevölkerung – Fläche und Bevölkerung, Stand: 5. März 2010
- SAI Platform** (2003): Sustainable Agriculture Initiative Platform, sustainable agriculture information, www.saiplatform.org
- Schaub, G. Vetter, A.** (2007): Biokraftstoffe – Eine Übersicht. Chemie Ingenieur Technik 79, 5, S. 569-578
- Schmidt-Bleek, F.** (1993): Wieviel Umwelt braucht der Mensch – mips, das ökologische Maß zum Wirtschaften“, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin
- Schubert, H.** (1982): Kapillarität in porösen Feststoffsystemen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Schubert, H.** (2007): Lebensmittelwirtschaft. Materialien Nr. 17 der Interdisziplinären Arbeitsgruppe „Zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume – LandInnovation – “ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Jägerstr.22/23, D-10117 Berlin
- Shiklomanov, I.A.** (1993): World water resources. Publiziert in: Gleick, P.H. (Hrg.): Water in crisis. Oxford University Press, New York, Oxford
- Sonnenberg, A., Chapagain, A., Geiger, M., August, D.** (2009): Der Wasser-Fußabdruck Deutschlands. Woher stammt das Wasser, das in unseren Lebensmitteln steckt? Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Steiner, M., Sprich, H., Lehn, H., Linckh, G.** (1997): Einfluss der Land- und Forstwirtschaft auf die Ressource Wasser. Publiziert in: Linckh, G., Sprich, H., Flaig, H., Mohr, H. (Hrg.): Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- UBA - Umweltbundesamt** (2010): Wasserwirtschaft in Deutschland, Teil 1 – Grundlagen. UBA-Homepage www.umweltbundesamt.de/wasser/veroeffentlich/kostenlos.htm Dessau-Roßlau, Stand Juli 2010; bzw.: www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2255

UBA - Umweltbundesamt (2011): Daten zur Umwelt: Wassernutzung in der Landwirtschaft. UBA-Homepage www.umweltbundesamt.de/daten-zur-umwelt, Dessau-Roßlau, aktualisiert Januar 2011

UN (United Nations), (2007): World Population Prospects: The 2006 Revision. United Nations population Division, May 2007

UNDP (United Nations Development Programme) (2005): Effective Water Governance. Factsheet of UNDP, 2005-04-31

Wackernagel, M., Rees, W.E. (1996): Our ecological footprint : Reducing human impact on the earth. New Society Publishers, Philadelphia, PA

Wefer, G. (Hrg.) (2010): Dynamische Erde – Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften. Strategieschrift der DFG-Senatskommission für die Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung, Online-Ausgabe

WFN (2008): Water Footprint Network, initiiert von Arjen Y. Hoekstra und verwaltet von der Universität Twente in Enschede/Niederlande; (www.waterfootprint.org)

World Water Council (Hrg.) (2004): E-Conference Synthesis: Virtual Water Trade – Conscious Choices, March 2004, ISBN: 92-95017-10-2 World Wide Fund For Nature – WWF Deutschland, Frankfurt am Main (www.wwf.de)

Zehnder, A.J.B. (2002): Wasserressourcen und Bevölkerungsentwicklung. Nova Acta Leopoldina NF 85, 323, S. 399-418

Zimmer, D., Renault, D. (2003): Virtual water in food production and global trade. Publiziert in: Hoekstra, A.Y. (Hrg.) (2003): Virtual water trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series 12, UNESCO-IHE Delft, The Netherlands, S. 93-109

MATERIALIEN DER PROJEKTGRUPPE „GEORESSOURCE WASSER – HERAUSFORDERUNG GLOBALER WANDEL“

Wiesmann, Udo: *Historische Impressionen bei einer Spreefahrt durch Berlin*, acatech Materialien Nr. 2, München 2011.

Insa Theesfeld and Christian Schleyer: *Institutional Requirements for Integrated Water Resource Management in Germany*, acatech Materialien Nr. 3, München 2011.

Helmar Schubert: *Die Konzepte des Virtuellen Wassers und des Wasser-Fußabdrucks*, acatech Materialien Nr. 4, München 2011.

Der aktuelle Stand der acatech Materialien zum Projekt „Georessource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel“ sowie einzelne Texte sind unter anderem im Internet unter <http://www.acatech.de/de/projekte/laufende-projekte/georessource-wasser.html> einsehbar. An gleicher Stelle sind auch Hinweise auf weitere Publikationen und auf Veranstaltungen im Rahmen des Projektes zu finden.