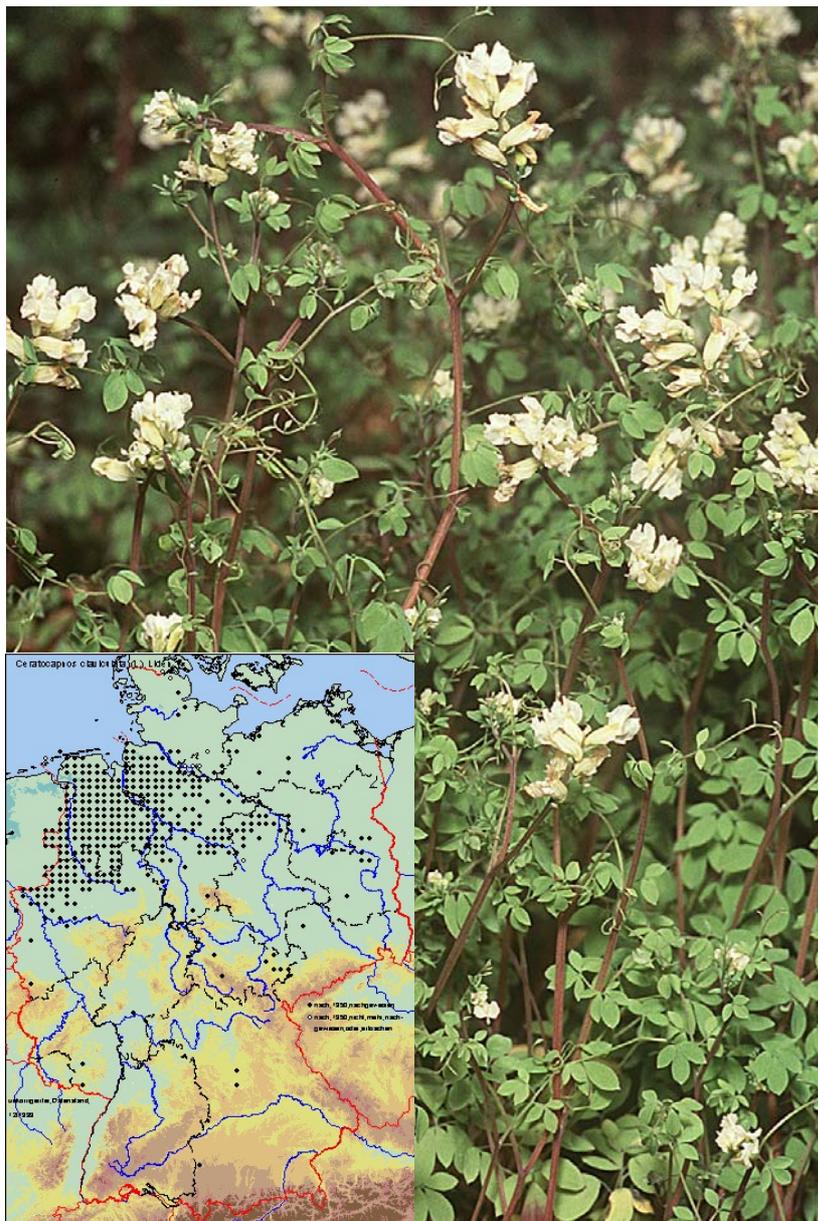


Christoph Leuschner
Florian Schipka

Vorstudie
**Klimawandel und Naturschutz
in Deutschland**



**Christoph Leuschner
Florian Schipka**

Vorstudie
**Klimawandel und Naturschutz
in Deutschland**

**Abschlußbericht eines F+E-Vorhabens
zur Erstellung einer Literaturstudie
(FKZ: 80383010)**

**im Auftrag des
Bundesamtes für Naturschutz**



Titelfoto: Arealerweiterung des Rankenden Lerchensporns (*Ceratocarpus claviculata* (L.) LIDÉN) in den letzten Jahrzehnten als Beispiel für das Zusammenwirken von menschlicher Verschleppung, Stickstoffeinträgen und milderem Wintern (Foto: Thomas Muer; Karte: www.floraweb.de)

Adresse der Bearbeiter:
Prof. Dr. Christoph Leuschner
Dr. Florian Schipka
Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften
Abt. Ökologie und Ökosystemforschung
Universität Göttingen
Untere Karspüle 2
37073 Göttingen

Fachbetreuung im BfN: Frank Klingenstein
Fachgebiet I 1.2 (Botanischer Artenschutz)

Die Beiträge der Skripten werden aufgenommen in die Literaturlatenbank „**DNL-online**“ (www.dnl-online.de).

Die BfN-Skripten sind nicht im Buchhandel erhältlich.

Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz
Konstantinstr. 110
53179 Bonn
Telefon: 0228/8491-0
Fax: 0228/8491-200
www.bfn.de

Stand: Juli 2004

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck, auch in Auszügen, nur mit Genehmigung des BfN.

Druck: BMU-Druckerei

Gedruckt auf 100% Altpapier

Bonn – Bad Godesberg 2004

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
1. ZUSAMMENFASSUNG	2
2. ARBEITSBERICHT	4
3. KURZE LITERATURSYNOPSIS	6
3.1 Analyse aktueller Klimatrends und Erstellung von regionalen Klimaszenarien (A)	6
3.1.1 Klimatrends (AU)	7
3.1.1.1 Aktuelle Klimatrends (AU2)	7
3.1.1.2 Paläoklimatologische Beobachtungen (AU1)	8
3.1.2 Grundlagen des Klimageschehens (AG)	9
3.1.3 Klima-Modelle und -Prognosen (AM)	9
3.1.3.1 Erstellung, Anwendung und Validierung von Klimamodellen (AM1)	9
3.1.3.2 Modellergebnisse und Prognosen (AM2)	10
3.2 Klimawirkungsforschung (B)	12
3.2.1 Klimawirkungsforschung auf der Ebene von Arten, Floren- oder Faunenelementen (BS)	12
3.2.1.1 Klimawirkungsforschung an Pflanzen und Tieren zu Entwicklung, Lebenszyklus, Phänologie und Verhalten (BSP1 und BST1+2)	13
3.2.1.2 Physiologische Klimawirkungsforschung (BSP3, BST3)	14
3.2.1.3 Populationsbiologische Aspekte in der Klimawirkungsforschung (BSP4, BST4)	16
3.2.2 Klimawirkungsforschung auf der Ebene von Lebensgemeinschaften und Ökosystemen (BO)	17
3.2.2.1 Klimawirkungsforschung zu ökosystemaren Eigenschaften, Zuständen und Prozessen (BOZ)	17
3.2.2.2 Klimawirkungsforschung in unterschiedlichen Habitaten und Ökosystemtypen (BOH)	18
3.2.3 Modelle in der Klimawirkungsforschung (BM)	18
3.3 Langfristige Veränderung von Verbreitungsarealen einzelner Arten und von Ökosystemen (C)	19
3.3.1 Klimawandel und Dokumentation von Arealveränderungen (CU)	19
3.3.2 Modelle und Prognosen zu Arealveränderungen (CM)	20
3.3.2.1 Modelle und Prognosen zu Arealveränderungen einzelner Arten (CMS)	20
3.3.2.2 Modelle und Prognosen zu Arealveränderungen von Lebens- gemeinschaften (CMH)	21

3.4 Sensitivitätsanalyse von Arten und Lebensgemeinschaften (D)	21
4. BEWERTUNG DES VORLIEGENDEN WISSENS	26
4.1 Die räumlich expliziten Klimaprognosen sind ausreichend	26
4.2 Erwartete Areal- und Abundanzveränderungen.....	26
4.3 Hohe zu erwartende Diversitätsverluste	27
4.4 Unbefriedigendes Wissen zur Wirkung von Klimaänderungen.....	27
4.5 Multiple Stressantworten sind kaum bekannt	27
4.6 Arealveränderungen sind vergleichsweise gut dokumentiert	27
4.7 Das vorliegende Wissen reicht für naturschutzpolitische Handlungsempfehlungen nicht aus.....	28
5. WEITERER FORSCHUNGS- UND HANDLUNGSBEDARF	29
5.1. Forschungsprogramm: Experimentelle Klimawirkungsforschung	29
5.2. Erarbeitung einer Gefährdungsanalyse und eines Handlungskonzepts für den Arten- und Lebensraumschutz in Deutschland unter dem Einfluß eines Klimawandels	29
5.2.1 Gefährdungsanalyse im Hinblick auf den Arten- und Lebensraumschutz in Deutschland.....	30
5.2.2 Prioritäre Maßnahmen im deutschen Naturschutz vor dem Hintergrund eines Klimawandels.....	33
5.2.3 Empfehlungen zu vorsorgenden Maßnahmen für einen in Bezug auf den Klimawandel zukunftsorientierten Naturschutz.....	33
5.2.4 Fachliche Anforderungen an die Studie „Erarbeitung einer Gefährdungsanalyse und eines Handlungskonzeptes für den Arten- und Lebensraumschutz in Deutschland“	33

Vorwort

Dieser Abschlußbericht ist Teil der Ergebnisse eines F+E-Vorhabens, in dem anhand der bisher zum Themenbereich „Klimawandel und Naturschutz“ publizierten Literatur abgeschätzt werden sollte, welche Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Deutschland nachweisbar sind.

Dazu wurden von der Abteilung für Ökologie und Ökosystemforschung am Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Göttingen ca. 1.000 Literaturquellen ausgewertet. Neben einer Auswahl der 40 wichtigsten Arbeiten und deren Zusammenstellung in einer Materialsammlung und der verschlagworteten und dokumentierten Literaturdatenbank stellt dieser Bericht die Auswertung der analysierten Literatur dar, fasst die wesentlichen Aussagen zu den o.g. Themenfeldern zusammen und skizziert zukünftigen Forschungsbedarf zu Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Deutschland.

Dabei erwies sich die vorliegende Literatur als aussagekräftig genug, um bisherige Veränderungen abzusichern, wonach sowohl der Klimawandel als auch dessen Auswirkungen auf Arten und Lebensräume für Mitteleuropa als belegt gelten können. Es scheint absehbar, dass in Deutschland klimawandelbedingte Artenverluste in den nächsten Jahrzehnten weitaus höher sein werden als es die Aussterberate durch Lebensraumverluste jemals war.

Um die Mechanismen und Auswirkungen des Klimawandels besser abschätzen zu können und ggf. Maßnahmen abzuleiten, werden verstärkt für den praktischen Naturschutz anwendbare Forschungsaktivitäten gefordert.

Bundesamt für Naturschutz

1. Zusammenfassung

1. Jüngste Publikationen (z.B. Thomas et al. 2004, Nature 427: 145-148) verdeutlichen das **Gefährdungspotential**, dem schutzwürdige Arten und Lebensräume durch den sich abzeichnenden Klimawandel in den nächsten Dekaden ausgesetzt sind. Je nach Szenario wird prognostiziert, daß 10 bis 50 % der Arten auf lokaler oder globaler Ebene aussterben werden, weil die vorhandenen Schutzgebiete den erwarteten klimawandel-bedingten Wanderungsbewegungen in keiner Weise entsprechen. Artenverluste infolge Klimawandels werden danach in naher Zukunft bedeutender sein als solche durch direkte Lebensraumverluste, wie dies heute der Fall ist. Es ist wahrscheinlich, daß diese Szenarien auch für Deutschland gelten und mit einem Artenverlust im Bereich von 5 – 30 % zu rechnen ist.

2. Grundlage der vorliegenden Studie ist eine **Literaturrecherche** zu den 4 Themenfeldern:

A - Aktuelle Klimatrends und Erstellung von regionalen Klimaszenarien

B - Klimawirkungsforschung

C - Langfristige Veränderung von Verbreitungsarealen einzelner Arten und von Ökosystemen

D - Sensitivitätsanalyse von Arten und Lebensgemeinschaften

Rund 1000 Zitate wurden in einer **Literaturdatenbank** auf Basis des Programms Reference Manager abgelegt, verschlagwortet und mit einem Thesaurus in Themengebiete gegliedert. Der Schwerpunkt der Publikationen hat räumlichen Bezug zu Mitteleuropa. 40 Arbeiten, die in den verschiedenen Themenfeldern als richtungsweisend eingeschätzt werden, wurden als Kopien thematisch zugeordnet in einem Anhang beigefügt, um den Einstieg in den Wissensstand zu erleichtern.

3. Eine **knapp synthese des Forschungsstandes** und der Forschungslücken zu den oben genannten 4 Themenfeldern zeigt vorliegende wesentliche Erkenntnisse der Klimawandel- und Klimawirkungsforschung auf und identifiziert Wissenslücken.

4. Es wurde die Schlußfolgerung gezogen, daß das bisher vorliegende Wissen für die Erarbeitung einer Gefährdungsanalyse und von konkreten Handlungsvorschlägen für einen zukünftigen Naturschutz in Deutschland nicht geeignet ist, weil

(a) nur in seltenen Fällen Forschung an schutzwürdigen Arten durchgeführt wurde, und

(b) eine Regionalisierung auf deutsche Teilregionen und Landschaften nicht erfolgt ist.

5. Es wird eine kurze Analyse des **Forschungs- und Handlungsbedarfs** gegeben.

(1) Es wird ein Forschungsprogramm „Experimentelle Klimawirkungsforschung“ empfohlen, das sich auf beispielhafte Modellorganismen und Modellökosysteme konzentriert und von den fachlich zuständigen Bundesministerien in Deutschland getragen werden sollte.

- (2) Im Rahmen einer vom Bundesamt für den Naturschutz zu betreuenden Studie sollte eine räumlich explizite Gefährdungsanalyse der Schutzgüter im deutschen Naturschutz und Empfehlungen für eine mittel- bis langfristige Prioritätensetzung im Naturschutz erarbeitet werden. In dieser Studie sollten die vorhandenen arealgeographisch-ökologischen Daten in Deutschland mit dem Wissen über die Wirkung von Klimaveränderungen verknüpft werden.

2. Arbeitsbericht

Im Rahmen des F + E-Vorhabens „Vorstudie Klimawandel und Naturschutz“ (Bewilligungszeitraum 15.11.03 bis 30.05.04) wurden für die vorliegende Literaturdokumentation insgesamt etwa 1000 Literaturstellen zu vier definierten Themenbereichen zusammengetragen:

- A - Aktuelle Klimatrends und Erstellung von regionalen Klimaszenarien
- B - Klimawirkungsforschung
- C - Langfristige Veränderung von Verbreitungsarealen einzelner Arten und von Ökosystemen
- D - Sensitivitätsanalyse von Arten und Lebensgemeinschaften

Literatur zu diesen Themenbereichen wurde mit Hilfe der Internet-Literaturdatenbanken ISI Web of Science, ISI Proceedings, BIOSIS Previews sowie Biological Abstracts (1997-2004) über die Literaturrecherche-Plattformen ISI Web of KNOWLEDGE und WebSPIRS recherchiert. Zu sämtlichen recherchierten Publikationen bestand entweder online-Zugang (zahlreiche wissenschaftliche Zeitschriften) oder Zugang über die Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen mit angeschlossenen Institutsbibliotheken sowie durch einen Besuch der Senckenbergischen Bibliothek der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt. Durch Literatur-Querverweise in den recherchierten Veröffentlichungen und auf Internetseiten zum Themenkomplex Klimawandel und Naturschutz konnten weitere relevante Literaturstellen erschlossen werden.

Die recherchierten Literaturstellen wurden in einer Literaturdatenbank auf Basis des Programms Reference Manager (Professional Edition Version 10) erfasst.

Für die in der Literaturdatenbank erfassten Veröffentlichungen zu den vier Themenbereichen wurde ein detailliert gegliederter Thesaurus aufgestellt. Dieser erlaubt einen Literatur-Zugriff auf in verschiedenen hierarchischen Gliederungsebenen unterschiedlich eng eingegrenzte thematische Aspekte der Klima- und Klimafolgenforschung. Die Gliederung des Thesaurus orientiert sich dabei an der gesamten Breite des inhaltlichen Spektrums der aktuellen Klima- und Klimafolgenforschung, gewichtet aber auch eine unterschiedlich intensive Forschungs- und Veröffentlichungstätigkeit in verschiedenen thematischen Teilbereichen.

Außer über die inhaltliche Gliederung des Thesaurus besteht ein thematischer Zugang zu Literaturstellen in der Datenbank auch noch über eine Schlagwortliste. Diese enthält deutsche und englische Begriffe, da ein Großteil der wissenschaftlichen Publikationen englisch erfolgt.

Für Literaturstellen, die den Themenbereichen B, C und D zuzuordnen sind, wurden taxonomische Begriffe (Artnamen, Familien, Ordnungen, Klassen usw.) von den inhaltlichen Schlagworten getrennt erfasst, und daraus eine Taxa-Liste erstellt. So können bei der Recherche in der erstellten Literaturdatenbank auch Veröffentlichungen zu bestimmten Arten oder höheren taxonomischen Ebenen gezielt abgefragt werden. Für den überwiegenden Teil der in der Literaturdokumentation erfassten Veröffentlichungen enthält der jeweilige Datenbankeintrag zudem eine kurze Zusammenfassung (abstract) der Kerninhalte.

Die wissenschaftliche Literatur zu allen im Rahmen der Literaturstudie behandelten Themenbereichen der Klima- und Klimafolgenforschung erwies sich als umfangreich, aktuell und für den

Themenkomplex Klimawandel und Folgen für den Naturschutz relevant und aussagekräftig. In zahlreichen Studien werden vielfältige Aspekte der Klima- und Klimafolgenforschung differenziert behandelt. Zugleich hilft eine Reihe von neueren review-Artikeln, einen guten Überblick über den Stand der Forschung und aktuelle thematische Forschungsschwerpunkte zu gewinnen. Zusammen mit Informationen auf Internetseiten einschlägiger Institutionen, wissenschaftlicher Programme und Netzwerke (z.B. European Phenology Network - EPN, GLORIA, MONARCH, DIVERSITAS) können die in der vorliegenden Literaturdokumentation zusammengetragenen Veröffentlichungen ein umfassendes Bild der Themen, Fragestellungen und Ergebnisse im Bereich der aktuellen Klima- und Klimafolgenforschung mit Bezug zu naturschutzfachlichen Aspekten vermitteln.

3. Kurze Literatursynopse

Die Gliederung des folgenden Literaturüberblicks entspricht im wesentlichen der Gliederung des für die Literaturdatenbank angelegten Thesaurus. Daher werden jene Zeichen-Codes, die einzelnen thematischen Gliederungsebenen im Thesaurus zugeordnet sind, auch in dieser Literatursynopse bei den entsprechenden Kapitelüberschriften angegeben. Dies ermöglicht einen schnellen Zugriff auf die jeweilige Literatur zu den im folgenden behandelten Teil-Aspekten des Themenkomplexes Klimawandel und Naturschutz.

3.1 Analyse aktueller Klimatrends und Erstellung von regionalen Klimaszenarien - (Themenbereich A)

Nach dem Bericht der im Rahmen des Umweltprogramms der Vereinten Nationen etablierten Klimaforschungs-Plattform IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) nahm im Verlauf des 20. Jahrhunderts die bodennahe Lufttemperatur global im Mittel um 0.6 K zu (IPCC 2001). Dies ist der stärkste säkulare Temperaturanstieg der letzten 1000 Jahre.

Dabei war in Europa eine überdurchschnittliche Erwärmung um 0.8 K zu beobachten, wodurch sich die Isothermen hier im Mittel um 120 km nordwärts verschoben haben (Beniston et al. 1998)

In der aktuellen Klimawandel-Ursachenforschung gilt eine anthropogene Klimabeeinflussung in Form eines Treibhauseffektes durch den vermehrten Ausstoß von CO₂ und weiteren klimawirksamen Gasen (CH₄, N₂O) als mittlerweile klar identifizierbar. Wissenschaftlicher Konsens ist, daß der bisher beobachtete Erwärmungstrend sich im kommenden Jahrhundert durch einen weiteren starken Anstieg der Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre voraussichtlich noch beschleunigen wird (IPCC 2001).

Ein fortschreitender anthropogener Klimawandel auch in Deutschland wird somit in Fachkreisen kaum mehr in Frage gestellt (Rahmstorf 2003: Bild der Wissenschaft 1/2003). Autoren, die den Temperaturanstieg auf andere als anthropogene Treibhausgase zurückführen, sind klar in der Minderheit (Berner & Streif 2001).

In der vorliegenden Literaturdokumentation behandeln 164 Veröffentlichungen und somit 18 % aller Literaturstellen aktuelle Klimatrends und die Erstellung von Klimaszenarien für Zeiträume der nächsten 20 – 100 Jahre.

3.1.1 Klimatrends (AU)

3.1.1.1 Aktuelle Klimatrends (AU2)

Innerhalb des Themenbereichs A beschäftigen sich 52 Veröffentlichungen, das sind 30 % aller klimatologischen Studien, mit aktuellen Trends von Klimaparametern wie Temperatur, Niederschlag und Strahlung sowie dem Auftreten von Extremereignissen.

Die Analyse der aktuellen Klimaentwicklung ergibt für Deutschland den Trend einer ansteigenden Jahresmitteltemperatur, der mit + 0.9 K im Verlauf der letzten hundert Jahre über dem weltweiten und europäischen Mittel liegt (Klimastatement 2003).

Dieser **Temperaturanstieg** war zeitlich allerdings nicht gleichmäßig verteilt, sondern beruht vor allem auf einer Temperaturzunahme im ersten Jahrzehnt und einer weiteren Periode der Erwärmung in den 80er und 90er Jahren des 20. Jahrhunderts (Müller-Westermeier 2002 in: DWD-Klimastatusbericht 2001). Ursache dafür ist eine Überlagerung des anhaltenden anthropogenen Erwärmungstrends durch natürliche Klimaschwankungen. Die letzten 10 Jahre des 20. Jahrhunderts waren jedoch in Deutschland wie weltweit das wärmste Jahrzehnt des Jahrhunderts. In Deutschland war das Jahr 2000 das wärmste seit 1761 (Klimastatement 2003).

Während in der Trendanalyse über 100 Jahre (1896-1995) noch der Sommer (+ 0.9 K) und der Herbst (+ 1.1 K) den stärksten positiven Trend aufweisen, tritt in der Vergleichsperiode 1966 – 1995 der Erwärmungstrend außer im Sommer (+ 1.0 K) vor allem im Frühling (+ 1.4 K) und im Winter (+ 1.6 K) am deutlichsten hervor (Rapp 2002). Die letzten zehn Jahre des 20. Jahrhunderts fielen durch besonders milde Winter auf. Sieben dieser letzten 10 Winter waren überdurchschnittlich mild, 3 davon gehörten zu den 10 wärmsten des Jahrhunderts (Müller-Westermeier 2002 in: DWD-Klimastatusbericht 2001).

In Mitteleuropa liegen Messreihen vor, die bis ins 18. Jahrhundert zurückreichen und an deren Anfang Perioden erkennbar sind, die ebenso warm oder noch wärmer waren als die Gegenwart. Der Erwärmungstrend der letzten 100 Jahre wird dadurch relativiert.

Anders als bei den in ganz Deutschland relativ einheitlichen Temperaturtrends weisen die **Niederschlagstrends** deutliche regionale Unterschiede auf.

Der Jahresniederschlag hat in den letzten 100 Jahren (1896-1995) im Westen Deutschlands verbreitet und signifikant um etwa 10 - 20% zugenommen. Nur im Osten Deutschlands ist hier kein eindeutiger Trend festzustellen. Die Zunahme des Jahresniederschlags beruht dabei vor allem auf einer Zunahme der Niederschläge im Winter, die mit Ausnahme des Ostens regional unterschiedlich sogar 20 – 40 % erreicht. Auch im Frühling ist eine deutliche Zunahme des Niederschlags zu beobachten, maximal im Westen und in der Mitte Deutschlands um ca. 10 - 35 %.

Durch diese saisonal unterschiedliche Entwicklung ist der Anteil des Winterniederschlags am Gesamtjahresniederschlag in den letzten 100 Jahren deutlich gestiegen und liegt nun regional unterschiedlich mit ca. 18 – 31 % um 2 - 4 Prozentpunkte höher als vor 100 Jahren mit nur ca. 16 – 27 %. Auch für den Zeitraum 1966-1995 wurde im hydrologischen Winterhalbjahr eine Zunahme des Niederschlags um bis zu 30 % beobachtet (Rapp 2002 in: DWD-Klimastatusbericht 2001).

Innerhalb Europas ist beim Niederschlag eine Zunahme in Skandinavien und eine Abnahme im Mittelmeergebiet am stärksten signifikant. In Deutschland steht dem deutlichen Anstieg der Winterniederschläge eine leichte Abnahme der Niederschläge im Sommer gegenüber (Klimastatement 2003). Die auffallend erhöhten Winterniederschläge können nur teilweise mit natürlichen zyklischen Schwankungen im Klimasystem, etwa mit Phänomenen wie der Nordatlantische Oszillation (NAO) erklärt werden, und sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Änderungen im Klimasystem infolge des Treibhauseffekts zurückzuführen (Schmith 2001, Bissoli 2002, Tinz 2003).

Da über die letzten 100 Jahre das Ausmaß der Zunahme des Jahresniederschlags den Einfluß des zugleich beobachteten Temperaturanstieges übertraf, wird mit Ausnahme des Ostens für einen großen Teil Deutschlands ein langfristiger Trend zu einem humideren Klima erkennbar. Für den Betrachtungszeitraum 1966-1995 bewirkte dagegen eine besonders ausgeprägte Tendenz zur Sommertrockenheit (um bis zu 30 % geringere Sommer-Niederschläge) bei gleichzeitig ansteigenden Temperaturen für weite Teile Deutschlands (mit Ausnahme des Nordens und des Westens) eine leichte Abnahme der Humidität.

Ein Vergleich der Entwicklung der Temperaturdifferenz zwischen Sommer und Winter zeigt, daß das Klima im Verlauf der letzten 30 Jahre im Norden und in der Mitte Deutschlands thermisch ausgeglichener (Abnahme der Temperaturdifferenz um ca. 0.5 - 1.5°C), im Süden dagegen etwas kontinentaler geworden ist (Zunahme der Temperaturdifferenz um ca. 0.5°C) (Rapp & Schönwiese 1996, Rapp 2002 in: DWD-Klimastatusbericht 2001)

In den gemäßigten Breiten allgemein wie auch in Mitteleuropa war im Verlauf des 20. Jahrhunderts eine Zunahme der mittleren Bewölkung um 2 % zu beobachten. Dies ging einher mit einer Abnahme der mittleren Tagesamplitude der Temperatur und einem Rückgang der auf der Erdoberfläche eintreffenden kurzwelligen Strahlung (Liepert 1997, McKenzie et al. 2003).

Insgesamt ist für Deutschland im 20. Jahrhundert ein Klimatrend zu niederschlagsreicheren und deutlich milderem Wintern sowie zu wärmeren und häufiger trockenen Sommern festzustellen.

3.1.1.2 Paläoklimatologische Beobachtungen (AU1)

Die paläoklimatologische Literatur mit Bezug zu Deutschland wurde hier nur zu einem kleinen Teil erfaßt. Umfangreiche Fachbibliotheken befinden sich z.B. in der Abteilung Palynologie und Klimadynamik der Universität Göttingen und im Niedersächsischen Institut für Historische Küstenforschung in Wilhelmshaven. In der vorliegenden Literaturdokumentation stellen 12 Veröffentlichungen Ergebnisse paläoklimatologischer Beobachtungen dar.

In paläoklimatologischen Untersuchungen werden in der Regel sogenannte Proxy-Daten (proxies) ausgewertet. Dies sind Datenquellen, die indirekt Auskunft über frühere Klimabedingungen, also die bisherige Klimaentwicklung geben.

Beispiele für proxies sind etwa der CO₂-Gehalt und die Isotopenzusammensetzung von Eisbohrkernen; Pollenablagerungen in Mooren; die Isotopenzusammensetzung sowie C-, N-, und S-

Gehalte von Plankton-Ablagerungen in See-Sedimenten; Fossilien; Baumringe; historische Berichte über Flora, Fauna und Klima aus Landwirtschaft, Jagd, Seefahrt usw.

Paläoklimatologische Untersuchungen liefern Information über Dimensionen und Geschwindigkeiten von Klimaänderungen und die resultierenden Auswirkungen auf Organismen und Ökosysteme in früheren Phasen der Erdgeschichte. So sind gerade paläoklimatologische Untersuchungen wichtige Grundlage etwa für die Abschätzung der Folgen der Klimaerwärmung im Hinblick auf einen Meeresspiegelanstieg (Lambeck et al. 2002) oder die Änderung globaler Meeresstrom-Zirkulationen, die seit dem letzten Eiszeitzyklus wiederholt einen nichtlinearen, kurzfristigen und markanten Einfluß auf das Klima in Europa nahmen (Rahmstorf 2002, Nature 419).

3.1.2 Grundlagen des Klimageschehens (AG)

Eine Reihe von Veröffentlichungen (38) behandelt grundlegende Vorgänge des Klimageschehens und betrachtet dabei sowohl natürliche Vorgänge (16) als auch Prozesse des anthropogenen Klimawandels (12). Themen sind beispielsweise: die Rolle atmosphärischer und Meeresstrom-Zirkulationen im Klimasystem der Erde, Auswirkungen von Wasserdampf und klimarelevanten (auch anthropogenen) Gasen wie CO₂ und Sulfataerosolen in der Atmosphäre auf das Klimasystem der Erde.

Ein besseres Verständnis von Zusammenhängen solcher klimatologischer und meteorologischer Parameter und Prozesse im Klimasystem ist wiederum für das Erstellen und Regionalisieren von Klimamodellen und ein Abschätzen des anthropogenen Einflusses auf das gegenwärtige und zukünftige Klima von Bedeutung.

3.1.3 Klima-Modelle und -Prognosen (AM)

3.1.3.1 Erstellung, Anwendung und Validierung von Klimamodellen (AM1)

Klimamodelle beschreiben das Klimasystem der Erde mit physikalisch-mathematischen Gleichungen, die es erlauben, für einen geographischen Raum die charakteristische Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Wetterzustände und -vorgänge zu berechnen. Dazu werden Erdatmosphäre und Ozeane, die beiden wichtigsten Klima-Einzelsysteme, in Gitterzellen mit derzeit typischerweise 250 - 500 km horizontaler Kantenlänge zerlegt. Die darin ablaufenden Prozesse werden parametrisiert, also aus den gegebenen physikalischen Randbedingungen über bekannte meteorologische Gesetzmäßigkeiten abgeleitet. Grundlage der Klimamodellierung stellen heute 'general circulation models' (GCM) dar, die großräumige Zirkulationen im Klimasystem simulieren.

In zahlreichen Artikeln werden vor allem seit Beginn der 1990er Jahre mit deutlich steigender Computer-Rechenleistung neue oder verbessert parametrisierte Klimamodelle und ihre Anwendung für die Simulation möglicher zukünftiger Klimaentwicklungen beschrieben. Zwei Drittel

(111) der klimatologischen Studien in der vorliegenden Literaturdokumentation behandeln Klima-Modelle und –prognosen.

Einen Überblick über die prinzipielle Vorgehensweise beim Erstellen von Klimamodellen sowie den aktuellen Stand der Klimamodellierung gibt beispielsweise Cubasch (2003) im DWD-Klimastatusbericht 2002.

Die Validierung von Klimamodellen anhand derzeit beobachteter Klima-Trends zeigt, daß die Ergebnisse heutiger numerischer klimatologischer Modelle weitgehend mit der tatsächlich beobachteten Klimaentwicklung übereinstimmen.

Allgemein sind jedoch Niederschlagsmodelle bzw. generell hydrologische Modelle noch mit größeren Unsicherheiten behaftet als Modelle zur Prognose der Temperaturentwicklung. Dies beruht zum einen auf einer deutlich schmaleren Beobachtungs- und Datengrundlage und zum anderen auf immer noch unvollständig verstandenen physikalischen Zusammenhängen bei hydrologischen Vorgängen des Klimageschehens (Allen & Ingram 2002).

Um von einer groben Auflösung global oder großräumig angelegter Klimamodelle wie etwa GCMs (general circulation models) auf die in der Klimafolgenforschung meist erforderlichen kleinräumigen Informationen zu kommen, werden sogenannte Downscaling-Modelle entwickelt. Dabei werden beispielsweise über kleinräumig aufgestellte statistische Beziehungen von regional gemessenen Klimaparametern zu Meßgrößen, die mit großräumig angelegten Klimamodellen vorhersagbar sind (Temperatur, Luftdruck), kleinräumig differenzierende Prognosen für Klimaparameter wie z.B. Niederschlag möglich (Cubasch 1998, Weichert & Bürger 1998, Murphy 2000, Beckmann & Buishand 2002)

3.1.3.2 Modellergebnisse und Prognosen (AM2)

Etwa die Hälfte der klimatologischen Untersuchungen (86) in der vorliegenden Literaturstudie stellen Ergebnisse von Klimamodellen und Prognosen zur Klimaentwicklung dar, 30 im globalen Rahmen und 56 auf Europa bezogen (davon wiederum 20 auf überregionaler, 36 auf regionaler Ebene). 13 Studien behandeln die Ergebnisse von Klimamodellierungen für gemäßigte Breiten auch außerhalb Europas.

Dem letzten Bericht des International Panel on Climate Change (IPCC 2001) zufolge nahm die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre von etwa 280 ppm im vorindustriellen Zeitalter auf 368 ppm im Jahr 2000 um rund ein Drittel zu und hat damit den höchsten Stand seit mehr als 400000 Jahren erreicht. Für die nächsten 100 Jahre ist mit einem weiteren starken Anstieg der CO₂-Konzentration auf weit über 500 ppm (bis zu 1000 ppm) zu rechnen.

Falls die Emission von Treibhausgasen weiterhin ähnlich stark ansteigt wie bisher, wird für die kommenden 100 Jahre im globalen Mittel ein Temperaturanstieg von 1.4 - 5.8 °C erwartet. Die relativ große Amplitude dieser Abschätzungen erklärt sich überwiegend aus den Unsicherheiten über den weiteren Verlauf der anthropogenen Klimabeeinflussung, die in verschiedenen Emissionsszenarien (SRES-Szenarien des IPCC [SRES = Special Report on Emission Scenarios]) simuliert wird. Spielt doch außer der Emission von Treibhausgasen auch der Ausstoß von SO₂ eine ent-

scheidende Rolle in der anthropogenen Klimabeeinflussung, da daraus entstehende Sulfataerosole in der Atmosphäre die kurzweilige Strahlung vor dem Eintreffen auf der Erdoberfläche abschirmen und so dem Treibhauseffekt entgegenwirken. Unsicherheiten in Klima-Prognosen beruhen aber auch auf noch immer bestehenden Schwächen der Klimamodellierung wie etwa Unwägbarkeiten bezüglich der feedback-Wirkungen zwischen Klima und Biosphäre (IPCC 2001, Klimastatement 2003).

Regionalisierte Klimamodelle (Annahme: vom Ausgangswert um $1\% \text{ a}^{-1}$ ansteigende CO_2 -Konzentration, mit / ohne Einfluß von Sulfataerosolen) prognostizieren für Mitteleuropa eine Temperaturerhöhung um 3.5 - 7 K im Winter und 2 - 4.5 K im Sommer bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071 - 2100) gegenüber Ende des 20. Jahrhunderts (1961 - 1990) (IPCC 2001). Dies stellt vor allem für den Winter in Mitteleuropa eine stärkere Erwärmung dar als die entsprechenden Modelle im globalen Mittel prognostizieren. Die auch im globalen Mittel prognostizierte Niederschlagszunahme fällt allgemein vor allem in den höheren Breiten der Nordhemisphäre (in Europa $> 50^\circ$) und hier wiederum vor allem im Winter besonders deutlich aus (IPCC 2001).

Neueste Modellierungen (Räisänen et al. 2004) prognostizieren für das Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) gegenüber 1961-1990 ebenfalls vor allem für Nord-, aber auch für Mitteleuropa eine Niederschlagszunahme im Winter und für Süd- und Mitteleuropa eine Niederschlagsabnahme im Sommer. Für Deutschland würde dies je nach Szenario um ca. 10 – 40 % höhere Winterniederschläge und ca. 20 – 50 % geringere Sommerniederschläge bedeuten, die Jahressumme des Niederschlags gegenüber heute jedoch nur wenig verändern.

Die Temperaturen lägen dieser Studie zufolge am Ende des 21. Jahrhunderts im Winter deutschlandweit recht einheitlich je nach Szenario um 1.5 – 5 K höher. Für den Sommer zeichnet sich jeweils ein Gradient zwischen dem stärksten Erwärmungstrend in Südwest-Deutschland und dem geringsten Erwärmungstrend in Nordost-Deutschland ab, was je nach Szenario um 2 – 4 K bis 4 – 8 K erhöhte Sommertemperaturen bedeuten würde.

Vielfach in der Literatur diskutiert wird ein mögliches Abreißen des Nordatlantikstromes (ein nordöstlicher Ausläufer des Golfstroms) durch eine fortschreitende Abschwächung der thermohyalinen Zirkulation bei zunehmender globaler Klimaerwärmung. Nach derzeitigem Kenntnisstand (Modellierungskapazitäten) gilt dies jedoch zumindest bis zum Ende des 21. Jahrhunderts als unwahrscheinlich. Tritt dieser Fall bei weiter anhaltender Klimaerwärmung jedoch ein, könnte der dann erheblich verringerte Wärmetransport nach Norden und Nordosten für Europa gravierende klimatische Folgen haben. Eine massive Abkühlung im nordatlantischen Bereich und also eine Umkehrung des anthropogenen Erwärmungstrends verbunden mit geringeren Niederschlägen in Europa gelten in diesem Fall als zu erwartende Folgen (Rahmstorf 1999 und 2003, Klimastatement 2003).

3.2 Klimawirkungsforschung - (Themenbereich B)

(Effekte auf Populationen, Arten, Lebensgemeinschaften, Habitate, Ökosysteme)

Für den Themenbereich B mußte angesichts der enormen Zahl von Veröffentlichungen und der großen thematischen Bandbreite im Bereich der Klimawandel-Wirkungsforschung bzw. der allgemeinen Klima-Wirkungsforschung eine besonders gründliche Literatursauswahl getroffen werden.

Insgesamt konnten trotz strenger Vorauswahl dennoch etwa 650 Literaturangaben von Veröffentlichungen zusammengetragen werden, die den aktuellen Stand der Klimawandel-Wirkungsforschung dokumentieren und für naturschutzfachliche Belange relevante Forschungsergebnisse vermitteln. Damit sind 2/3 aller im Rahmen der vorliegenden Literaturstudie recherchierten Veröffentlichungen dem Themenbereich B (Klima-Wirkungsforschung) zuzuordnen.

Von diesen behandeln etwa 450 Veröffentlichungen (45 % der Gesamtzahl aller Literaturstellen) Untersuchungen zur Klima-Wirkungsforschung auf der Betrachtungsebene einzelner Arten oder Floren- bzw. Faunenelemente (bestimmte taxonomische oder funktionale Organismengruppen, Lebensformen).

Mit etwa 400 Veröffentlichungen (40 % der Gesamtzahl) stellt eine fast ebenso große Zahl von Studien Klima-Wirkungsforschung auf der Betrachtungsebene von Lebensgemeinschaften (communities) und Ökosystemen dar.

3.2.1 Klimawirkungsforschung auf der Ebene von Arten, Floren- oder Faunenelementen (BS)

Im Bereich der Klimawirkungsforschung auf Ebene einzelner Arten oder Floren- bzw. Faunenelemente beschreiben 218 Veröffentlichungen Untersuchungen an Pflanzen, während in 246 Fällen die Klimawirkung auf Tiere untersucht wurde. Damit sind Pflanzen bzw. Tiere betreffend etwa gleiche große Anteile von jeweils etwa einem Viertel aller im Rahmen dieser Literaturstudie recherchierten Veröffentlichungen diesem Forschungsbereich zuzuordnen.

Demgegenüber werden in vergleichsweise sehr wenigen Studien (22) Ergebnisse der Klimawirkungsforschung veröffentlicht, die Mikroorganismen (vor allem im Boden) und Arten marinen bzw. limnischen Planktons betreffen.

Klimawirkungsforschung an Pflanzen bezieht sich in den weitaus meisten der in der vorliegenden Literaturstudie recherchierten Veröffentlichungen (95 %) auf höhere Pflanzen (Gefäßpflanzen). Nur selten sind dagegen Moose (4 %), Algen (2 %) oder Flechten (2 %) Gegenstand der Klimawirkungsforschung an Pflanzen.

Klimawirkungsforschung an Tieren bezieht sich bei 58 % der in der vorliegenden Literaturdokumentation recherchierten Veröffentlichungen auf Wirbeltiere, wobei allein die Veröffentlichungen über Klimawirkungsforschung an Vögeln bereits 33 % ausmachen. Die anderen Wirbeltierklassen Säugetiere (9 %), Amphibien (8 %) und Fische (6 %) sind deutlich seltener, Reptilien (2 %) ausgesprochen selten Gegenstand der zoologischen Klimawirkungsforschung.

In 52 % der Veröffentlichungen über Klimawirkungsforschung an Tieren werden Untersuchungen an wirbellosen Tieren behandelt, wobei allein die Veröffentlichungen über Klimawirkungsforschung an Insekten bereits 31 % ausmachen. Von den Untersuchungen an Insekten beschäftigt sich wiederum fast die Hälfte mit Schmetterlingen (Dies entspricht 14 % der Studien zu Klimawirkungsforschung an Tieren.). Krebstiere (7 %), Weichtiere (3 %) sowie Spinnen und andere Gliederfüßer (2 %) werden in der Klimawirkungsforschung an Tieren deutlich seltener berücksichtigt.

3.2.1.1 Klimawirkungsforschung an Pflanzen und Tieren zu Entwicklung, Lebenszyklus, Phänologie und Verhalten (BSP1 und BST1+2)

Die herrschenden Klimabedingungen haben bei Pflanzen wie auch bei Tieren einen regulierenden Einfluß auf den zeitlichen Verlauf (Beginn / Ende, Geschwindigkeit) von bestimmten Lebensvorgängen und das Durchlaufen charakteristischer Phasen im Jahres- oder Lebenszyklus. Das betrifft etwa Phänomene wie Reproduktion, Individual-Entwicklung, Aktivitäts- und Ruheperioden oder Zugverhalten. In der Klimawirkungsforschung werden der zeitliche Ablauf solcher Lebensvorgänge in Abhängigkeit vom Klima und ein möglicher bzw. bereits festzustellender Einfluß des Klimawandels häufig im Rahmen phänologischer Studien untersucht.

Phänologie Pflanzen

In einer Vielzahl von Studien (53) werden phänologische Phasen höherer Pflanzen (zumeist Blattaustrieb, Blühbeginn, aber auch Samenreife, herbstliche Laubfärbung oder Belaubungsdauer bzw. Dauer der Vegetationsperiode) und ihre Änderung vor dem Hintergrund aktueller Klimatrends untersucht. Häufig geschieht dies in vergleichenden Studien durch Zeitreihen-Untersuchungen phänologischer Daten aus den in verschiedenen Ländern Europas eingerichteten Internationalen phänologischen Gärten. Hier wird für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts in Europa eine Verlängerung der Vegetationsperiode um etwa 10 Tage erkennbar, sowohl durch einen im Mittel etwa 6 Tage früheren Blattaustrieb im Frühjahr als auch eine etwa 4 Tage spätere Laubfärbung im Herbst (Menzel 2000). Einen solchen Trend zeigen auffallend einheitlich auch andere mittel- und langfristige Beobachtungsreihen an ausgewählten Arten und/oder Lebensräumen in dann meist eng umgrenzten geographischen Räumen Europas, z.T. auch in den gemäßigten Breiten außerhalb Europas.

Phänologie Tiere

Im Themenbereich Klimawirkungsforschung beschäftigen sich 59 Veröffentlichungen mit phänologischen Untersuchungen an Tieren. Damit erweist sich die Zahl phänologischer Studien an Pflanzen und Tieren als etwa gleich groß.

Die weitaus am häufigsten phänologisch untersuchte Tiergruppe sind Vögel (75 %), gefolgt von Insekten (15 %), bei denen wiederum in mehr als der Hälfte der Fälle Schmetterlinge untersucht wurden.

Dementsprechend beschäftigen sich die meisten Untersuchungen mit phänologischen Daten des Vogelzugs, zumeist mit den Terminen der Ankunft der untersuchten Zugvogelart im Brutgebiet und / oder des Brutbeginns im Frühling, aber auch mit dem Wegzugtermin im Herbst. Hier wur-

den vor allem beim Ankunftstermin und Brutbeginn von Kurzstreckenziehern fast ausnahmslos Verschiebungen um mehrere Tage bis Wochen nach vorne festgestellt, ähnlich wie etwa auch bei Untersuchungen zu den Terminen des Beginns der Flugperiode, des Eiablagezeitpunkts oder der Vollendung des Lebenszyklus bei Insekten (z.B. Libellen in NW-Deutschland: Thomas 2002). Aber auch der Laichzeitpunkt bei Amphibien und Fischen ist Gegenstand phänologischer Klimawirkungsforschung (Beebe 1995, Tryjanowski et al. 2003).

In der phänologischen Klimawirkungsforschung spiegelt sich also der vor allem am Ende des 20. Jahrhunderts deutliche Erwärmungstrend in der Verschiebung phänologischer Phasen von Pflanzen sowie im Verhalten und Ablauf des Lebenszyklus von Tieren in vielfacher Weise wider. Dabei sind bei Tieren wie bei Pflanzen die stärksten Verschiebungen von phänologischen Phasen bei den Ereignissen festzustellen, die besonders früh im Jahr auftreten.

Über sehr häufig durchgeführte reine phänologische Beobachtungen hinaus können in einer Reihe von Untersuchungen die erhobenen phänologischen Daten mit verfügbaren Klimadaten korreliert und phänologische Veränderungen so konkret auf Änderungen des Klimas zurückgeführt werden. Phänologische Klimawirkungsforschung wird außer im natürlichen Lebensraum in einigen Fällen aber auch mit systematischen experimentellen Ansätzen betrieben.

Nur in wenigen weiter zielenden Untersuchungen wurden schließlich auch Auswirkungen veränderter phänologischer Phasen auf physiologische, populationsbiologische und ökologische Aspekte wie etwa Wachstum (Biomasseproduktion bei Pflanzen), Reproduktion (Samenreife bei Pflanzen, Reproduktionserfolg bei Vögeln abh. von phänologischer Synchronisation von Brutzeitraum und Nahrungsspeak), Mikroevolution, Mortalität und interspezifische Konkurrenz (Stand- / Zugvögel, kurz- / langstreckenziehende Vögel, höhlenbrütende Vögel / Siebenschläfer, früh / spät laichende Amphibien) in die wissenschaftliche Fragestellung einbezogen.

3.2.1.2 Physiologische Klimawirkungsforschung (BSP3, BST3)

Physiologische Klimawirkungsforschung an Pflanzen (BSP3)

Viele pflanzenphysiologische Untersuchungen im Rahmen der Klimawirkungsforschung beschäftigen sich mit der direkten Temperaturwirkung auf Wild- und Kulturpflanzen zum Beispiel in Form einer veränderten Gefährdung durch Frostschädigung durch zunehmend mildere Winter in Mitteleuropa (Inouye 2000).

Andere Studien untersuchen den Einfluß von infolge des Klimawandels verringerten Tagestemperatur-Amplituden auf die pflanzliche Respiration und die Rolle einer möglichen thermischen Akklimatisation der Pflanzen (Alward et al. (1999, Crawford 2000). Ein Trend zu geringeren täglichen Temperaturamplituden wurde sowohl in Mitteleuropa als auch in anderen Regionen gefunden.

Klimawirkungsforschung zum pflanzlichen Kohlenstoff- und Wasserhaushalt (BSP3V, BSP3W)

Ein breites Feld der ökophysiologischen Forschung beschäftigt sich mit Fragen des Einwirkens von veränderten Umweltfaktoren auf den pflanzlichen Kohlenstoff- und Wasserhaushalt. Meist geschieht dies im Rahmen von Grundlagenforschung, deren Ergebnisse aber für Fragestellungen und Forschungsansätze in der Klimawandel-Folgenforschung durchaus relevant sind.

Angesichts der stark ansteigenden CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, steigender Temperaturen und sich ändernder Niederschlagsverhältnisse mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für Trockenstress auch in Mitteleuropa werden Pflanzen im 21. Jahrhundert durch Klimawandel zum Teil erheblich veränderten Wachstumsbedingungen ausgesetzt sein. Dies könnte in besonderem Maße Pflanze der Roten Liste betreffen, weil diese häufig auf kleinklimatischen Sonderstandorten vorkommen.

Klimafaktoren, die vom Klimawandel betroffen sind und direkt auf die pflanzliche Physiologie und das Wachstum einwirken, sind die CO₂-Konzentration (CO₂ als Substrat der Photosynthese), die Lufttemperatur (die insbesondere die pflanzliche Atmung, aber auch die Photosynthese, Meristemaktivitäten und die Reproduktion beeinflussen), der sommerliche Niederschlag (der die Trockenstressgefährdung bestimmt) und die Luftfeuchtigkeit. Letztere ist stark von der Temperatur abhängig und beeinflusst direkt die Transpiration. Temperaturerhöhung kann daher nicht nur direkt auf die Pflanze einwirken, sondern könnte indirekt zu Trockenstreß aufgrund erhöhter Verdunstungsbeanspruchung bei hygromorphen Pflanzen führen.

Am zahlreichsten sind bisher Untersuchungen zum CO₂-Einfluß auf krautige Wild- und Kulturpflanzen sowie Bäume in Mitteleuropa. Vergleichsweise wenig ist bekannt über die Wirkung erhöhter Sommertrockenheit und Trockenheitsgrenzwerte bei einheimischen Pflanzen. Der Umweltfaktor Luftfeuchte wurde bisher fast gänzlich vernachlässigt. Die große Mehrheit pflanzenphysiologischer Klimawandel-Folgenforschung betrifft pflanzliche Reaktionen in kurzen Zeitspannen (Stunden bis Wochen). Das Überleben wird aber von der Langzeitwirkung abhängen (Monate bis Jahre). Hier besteht noch großer Forschungsbedarf. Ebenso wenig ist bisher die Interaktion verschiedener Klimaparameter (Temperatur, CO₂-Konzentration, Trockenheit) untersucht worden. Dies gilt insbesondere für mitteleuropäische Wildpflanzen.

In der vorliegenden Literaturstudie wurden 67 Artikel zur pflanzenphysiologischen Klimawirkungsforschung ausgewählt, vornehmlich solche, die sich speziell im Hinblick auf Auswirkungen des zu erwartenden Klimawandels mit dem pflanzlichen Kohlenstoff- (31) und Wasserhaushalt (20) beschäftigen. In vielen Fällen wird diese pflanzenphysiologische Klimawirkungsforschung an Bäumen durchgeführt (hohe Bedeutung der Wälder als Kohlenstoffspeicher), aber auch entsprechende Untersuchungen an Grünlandarten liegen vor. Die Messungen zum pflanzlichen Kohlenstoff- und Wasserhaushalt schließen Freiland-Untersuchungen unter natürlichen Klimabedingungen ein. Überwiegend wurden aber experimentelle Ansätze sowohl unter kontrollierten Bedingungen in Klimakammern als auch im Freiland (z.B. CO₂-Begasung: FACE-Experimente oder Beheizung am Standort) verfolgt.

Eine Reihe von Untersuchungen beschäftigt sich schließlich mit den möglichen indirekten Auswirkungen einer veränderten CO₂-Konzentration auf herbivore Insekten durch einen veränderten Kohlenstoffhaushalt der Nahrungspflanzen (Ehleringer et al. 2002).

Physiologische Klimawirkungsforschung an Tieren (BST3)

Der Einfluß des Klimas bzw. des Klimawandels auf die Physiologie von Tieren wird über alle taxonomischen Gruppen hinweg untersucht. Einen Schwerpunkt (40%) bildet hier aber die Untersuchung physiologischer Auswirkungen des Temperaturregimes (Optimaltemperatur, Kälte-/Frostresistenz) auf Insekten.

Darüber hinaus bilden allgemein Untersuchungen zur Temperaturwirkung auf die Stoffwechselphysiologie von der Zell- bis zur Ökosystemebene einen Kernbereich physiologischer Klimawirkungsforschung. Besonders großen Raum nehmen dabei Messungen zur Temperaturabhängigkeit der Atmung ein. Auch die Temperaturwirkung auf den Energiehaushalt von Tieren wird vor dem Hintergrund möglicher Auswirkungen des Klimawandels untersucht. Als besonders einflußreich auf die Fitness von Organismen hat sich der differenziert zu betrachtende zeitliche Temperaturverlauf erwiesen. Durch eine Betrachtung einfacher Temperatursummen oder –mittelwerte, wie sie in Untersuchungen zum globalem Klimawandel meist herangezogen werden, wird dieser Einflußfaktor jedoch nicht erfasst und kann nicht in Prognosen eingehen.

Des weiteren ist in einigen Studien die Wirkung von UV-Strahlung auf Tiere (z.B. Amphibien) Gegenstand physiologisch orientierter Klimawirkungsforschung.

3.2.1.3 Populationsbiologische Aspekte in der Klimawirkungsforschung (BSP4, BST4)

Klimawandel kann sich auf die Fitness (Überlebenswahrscheinlichkeit, Reproduktionserfolg) von Tier- und Pflanzen-Individuen bzw. Populationen entweder direkt auswirken (meist durch Wirkungsketten auf physiologischer Ebene) oder er kann indirekte Folgen haben, z.B. über eine Veränderung der Nahrungsgrundlage, der Bodeneigenschaften oder anderer Habitat-eigenschaften. Daraus kann eine Änderung der Abundanz einer Tier- oder Pflanzenart in ihrem Verbreitungsgebiet resultieren, eine Population ausgelöscht werden oder sogar eine Art aussterben.

Jüngste Modellrechnungen zur Abschätzung des Art-Extinktionsrisikos aufgrund von Klimaänderungen geben für (Mittel-)Europa einen Rahmen von etwa 10 – 30 % des derzeitigen Artbestandes an, für den bei jeweils unterschiedlichen Klimawandelszenarien bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts mit einem zumindest regionalen Aussterben zu rechnen ist (Bakkenes et al. 2002, Thomas et al. 2004).

Wie stark der Einfluß von Klimawandel auf die Fitness und Abundanz von Pflanzen- und Tierarten ist, hängt zum einen von der jeweils genetisch prädisponierten Anpassungsfähigkeit einer Population, eines Ökotyps oder einer Art an veränderte Klimabedingungen ab. Zum anderen kann ein veränderter Klima-Selektionsdruck auch populationsgenetische Veränderungen bis hin zu einer (Mikro-)Evolution verschiedener Populationen zu unterschiedlichen und neuen Ökotypen oder Arten bewirken.

In 137 Veröffentlichungen finden populationsbiologische Aspekte der Klimafolgenforschung wie der Einfluß von Klimawandel auf die Fitness von Populationen und Arten, die Art-

Abundanz, das Extinktionsrisiko von Arten sowie populationsgenetische Veränderungen Berücksichtigung. Dabei überwiegt die Zahl solcher Studien an Tierarten (103) deutlich die Zahl der Untersuchungen an Pflanzenarten (40).

3.2.2 Klimawirkungsforschung auf der Ebene von Lebensgemeinschaften und Ökosystemen (BO)

3.2.2.1 Klimawirkungsforschung zu ökosystemaren Eigenschaften, Zuständen und Prozessen (BOZ)

Inhaltliche Schwerpunkte der Klima-Wirkungsforschung auf der Betrachtungsebene von Lebensgemeinschaften und Ökosystemen sind:

- a) Untersuchungen ökosystemarer Prozesse des Energie- und Wasserhaushalts sowie Stoffumsätze in Ökosystemen [158]
- b) Untersuchungen zu Artenzusammensetzung und Diversität von Lebensgemeinschaften sowie zu biotischen Interaktionen auf Ökosystemebene (multi-trophische Beziehungen, Konkurrenz, Symbiose) [194]

Durch Klimawandel werden in Lebensgemeinschaften veränderte Konkurrenzbedingungen geschaffen, da die vorhandenen Arten in einer Lebensgemeinschaft unterschiedlich auf veränderte Klimabedingungen reagieren, also ihre Fitness auf unterschiedliche Weise beeinflusst wird (vgl. BSP4 & BST4: „Populationsbiologische Aspekte in der Klimawirkungsforschung“). Hieraus können Verschiebungen der Dominanzverhältnisse resultieren und infolgedessen das Extinktionsrisiko einer Art steigen.

Intensiv erforscht werden in jüngster Zeit diejenigen Faktoren, die das Extinktionsrisiko von kleinen Tier- und Pflanzenpopulationen bestimmen. Dies geschieht verstärkt auch vor dem Hintergrund veränderter Temperatur-, CO₂- und Niederschlagsbedingungen. Besonders gefährdet sind Tier- und Pflanzenpopulationen mit beschränkten Ausbreitungsmöglichkeiten in kleinen und fragmentierten Arealen. Die Zahl der in dieser Hinsicht untersuchten Organismen ist in Mitteleuropa jedoch bisher sehr begrenzt.

Klimawandel kann in einem Ökosystem also nicht nur zu einer veränderten Artzusammensetzung führen, sondern auch die Biodiversität verringern (vgl. BSP4/BST4, vgl. CM: „Modelle und Prognosen zu Arealveränderungen“). Außer Konkurrenzbeziehungen können auch trophische Beziehungen und Symbiosen durch unterschiedliche Wirkung des Klimawandels auf die beteiligten Arten verändert oder aufgelöst werden, mit wiederum potentiell gravierenden Folgen für die Fitness der beteiligten Arten.

Zusammenfassend muß festgehalten werden, daß das vorliegende Wissen über die Reaktion von Lebensgemeinschaften und Ökosystemen auf Klimaveränderungen bisher sehr unbefriedigend bleibt, vor allem weil die komplexen biotischen Interaktionen zwischen den Organismen nicht

oder nur in Grundzügen verstanden sind. Umfassende Manipulationsexperimente der Temperatur, CO₂-Konzentration und Feuchte an Ökosystemausschnitten stehen erst am Anfang und betreffen überwiegend Kurzzeit-Experimente, deren Übertragbarkeit auf reale Ökosysteme beschränkt ist (z.B. Bertness 1999, Arnott et al. 2003).

3.2.2.2 Klimawirkungsforschung in unterschiedlichen Habitaten und Ökosystemtypen (BOH)

Klima-Wirkungsforschung mit Untersuchungen zu ökosystemaren Zuständen, Eigenschaften und Prozessen (vgl. BOZ) findet überwiegend in terrestrischen Ökosystemtypen und Habitaten (150) statt. Davon wiederum die Mehrzahl der Untersuchungen behandelt Wälder (63), während Offenlandvegetation und Agrarlandschaften (33) sowie montane und alpine Habitate (36) weniger häufig und Moore (6) nur selten im Hinblick auf Folgen des Klimawandels untersucht werden. Diese Zahlenverhältnisse spiegeln mit einer auffälligen Betonung von Wäldern und einer vergleichsweise geringen Berücksichtigung von Grünlandgesellschaften und Agrar-Ökosystemen nur grob die Flächenanteile dieser Ökosystemtypen in Deutschland wider.

Etwa ein Drittel aller Studien im Rahmen ökosystemarer Klima-Wirkungsforschung stellt Ergebnisse aus Untersuchungen in limnischen (45), marinen (17) und litoralen (30) Ökosystemen dar. Die behandelten Fragestellungen sind dabei meist spezifisch auf das jeweilige aquatische Ökosystem ausgerichtet, entstammen aber den gleichen grundlegenden Themenbereichen wie sie oben bereits für terrestrische Ökosysteme beschrieben wurden.

3.2.3 Modelle in der Klimawirkungsforschung (BM)

(Modelle zu Arealveränderungen werden unter Themenbereich C behandelt)

In einer Vielzahl von Studien (89) werden mit Hilfe von Untersuchungsergebnissen der Klimawirkungsforschung Beziehungen zwischen Klimaparametern und biologischen bzw. Ökosystemparametern aufgestellt, die es erlauben, die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Organismen und Ökosysteme zu modellieren.

In der Klimafolgenforschung werden solche Modelle sowohl für die Auswirkungen von Klimaänderungen auf einzelne Arten als auch auf Populationen, funktionelle Gruppen, Lebensgemeinschaften und Ökosysteme erstellt. Beispiele sind hier etwa Modelle zur Vegetationsentwicklung bei einer Klimaänderung, aber etwa auch zum Einfluß veränderter Klimabedingungen auf hydrologische und geomorphologische Prozesse in einem Ökosystem.

Modelliert werden dabei unterschiedlichste Parameter aus Themenbereichen wie Morphologie, Physiologie, Lebenszyklus, Phänologie, Verhalten, Populationsbiologie Genetik und Biodiversität, sowie ökosystemare Zustände und Prozesse für alle oben angeführten Ökosystemtypen.

Ein auffallend hoher Anteil von fast 50 % aller Modell-Studien zu klimabedingtem Ökosystemwandel hat einen forstwissenschaftlichen bzw. forstwirtschaftlichen Hintergrund und beschäftigt sich mit Baum- und Waldwachstums- sowie Waldentwicklungs-Modellen. In diesen wird oft-

mals auch die künftige Artenzusammensetzung mitteleuropäischer Wälder unter veränderten Klimabedingungen modelliert. Diese Studien haben direkte Relevanz für den Naturschutz in Waldschutzgebieten aller Schutzkategorien vom Nationalpark zur Naturwaldzelle. Demgegenüber werden andere Ökosystemtypen in Ökosystem-Modell-Studien der Klimafolgenforschung vergleichsweise wenig berücksichtigt.

3.3 Langfristige Veränderung von Verbreitungsarealen einzelner Arten und von Ökosystemen - (Themenbereich C)

3.3.1 Klimawandel und Dokumentation von Arealveränderungen (CU)

In 160 Veröffentlichungen der vorliegenden Literaturstudie werden Beobachtungen von Arealveränderungen im Zusammenhang mit Klimaänderungen beschrieben. In 23 Fällen handelt es sich dabei um paläobiologische Studien, während in 141 Veröffentlichungen rezente Arealveränderungen beschrieben und untersucht werden. Dabei werden etwa gleich häufig rezente Arealveränderungen von Pflanzen (65) und von Tieren (73) behandelt. Eine deutlich geringere Anzahl von Studien (15) beschäftigt sich mit beobachteten Arealveränderungen auf der Ebene von Lebensgemeinschaften bzw. Ökosystemen.

Die Studien zu rezenten Arealveränderungen von Pflanzen beziehen sich zu etwa 75 % auf höhere Pflanzen (Samenpflanzen 40, Farne 4) und nur zu etwa 25 % auf Moose (13), Algen (2) und Flechten (4).

Entsprechende Studien zu Tieren befassen sich in mehr als 60 % aller Fälle mit rezenten Arealveränderungen bei Insekten (42), wobei Schmetterlinge (21) und Libellen (10) wiederum die am häufigsten bearbeiteten Gruppen darstellen. Auch für Vögel (13) werden vergleichsweise häufig Arealveränderungen im Zusammenhang mit Klimaänderungen beschrieben. Demgegenüber werden nur in jeweils wenigen Fällen Arealveränderungen von Säugetieren (5), Reptilien (2), Amphibien (2), Fischen (2), Weichtieren (5), Krebstieren (3) und anderen Tiergruppen behandelt.

In der vorliegenden Literaturstudie wurde in der Literaturrecherche und –auswahl zum Thema Arealveränderungen der Schwerpunkt deutlich auf Europa und insbesondere Mitteleuropa gelegt. In einigen Fällen (ca. 10 %) wurden aber auch besonders aussagekräftige Studien über beobachtete Arealveränderungen in den gemäßigten Breiten außerhalb Europas, selten aus anderen Klimazonen berücksichtigt.

In einer Reihe von Untersuchungen werden beobachtete Arealveränderungen mit Klimaparametern korreliert, so daß Arealgrenzen und ihre Veränderung jeweils auf artspezifisch begrenzende Klimabedingungen und deren Veränderung zurückgeführt werden können.

Für Deutschland und Mitteleuropa wird durch zahlreiche Beobachtungen von Arealveränderungen bei Pflanzen und Tieren im 20. Jahrhundert, vor allem in den letzten 20-30 Jahren, über alle taxonomischen Gruppen hinweg ein Trend deutlich:

Tier- und Pflanzenarten mit höheren Temperaturansprüchen, mithin in der Regel submediterrane, mediterrane, atlantische, aber auch subtropische und sogar tropische Arten wandern als Neophyten bzw. Neozoen ein oder breiten ihr Areal nach Norden und Osten aus. In den Mittel- und Hochgebirgsregionen entspricht dem eine beobachtete Verschiebung der Vegetationsgürtel und typischen Lebensgemeinschaften um ca. 50 - 100 Höhenmeter nach oben. Dem gegenüber steht ein allgemeiner Rückgang (abnehmende Abundanz und Arealverkleinerung) oder sogar ein Verschwinden von kältezeigenden und kontinentalen Arten. Dies sind vor allem Arten mit borealem oder arktisch-alpischem Verbreitungsgebiet.

3.3.2 Modelle und Prognosen zu Arealveränderungen (CM)

Über die Beschreibung und Untersuchung tatsächlich beobachteter Arealveränderungen hinaus werden in zahlreichen Studien (140) zu erwartende Arealveränderungen unter verschiedenartigen Klimawandelszenarien modelliert. Dies geschieht auf der Basis von Erkenntnissen aus tatsächlich beobachteten Arealveränderungen und Untersuchungen zum Ausbreitungspotential von Arten oder Lebensgemeinschaften sowie mit Hilfe von Ergebnissen der Klimawirkungsforschung (vgl. Themenbereich B).

Anders als bei Veröffentlichungen über tatsächlich bereits beobachtete Arealveränderungen, die sich weit überwiegend (noch) auf einzelne Arten oder Floren-/Faunenelemente beziehen, stellt bei der Modellierung von Arealveränderung auch die Betrachtungsebene von Lebensgemeinschaften bzw. Ökosystemen einen Forschungsschwerpunkt dar. Hier stehen 67 Veröffentlichungen über modellierte Arealveränderung von einzelnen Pflanzenarten bzw. 51 Veröffentlichungen eben solcher Modellierungen für Tierarten immerhin 53 Studien gegenüber, die Modelle zu potentiellen Arealveränderungen von Lebensgemeinschaften bzw. Ökosystemen vorstellen.

3.3.2.1 Modelle und Prognosen zu Arealveränderungen einzelner Arten (CMS)

116 Veröffentlichungen stellen Modelle und Prognosen zu klimabedingten Arealveränderungen einzelner Arten dar. Eine in vielen aktuellen Studien angewandte Vorgehensweise, um mit Modellen Aussagen über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Areale von Arten machen zu können, ist die Charakterisierung eines sogenannten ‘(bio-)climate envelope’.

Dabei wird folgende Annahme zu Grunde gelegt: Eine Art existiert nur innerhalb ihrer typischen klimatischen Rahmenbedingungen (Temperatur- und Niederschlagsregime in charakteristischer Saisonalität), unter denen sie in der Lage ist, im ökosystemaren Gefüge (Habitat, Nahrungsnetz, Konkurrenz usw.) zu überleben. Jede Art kann sich nur in dem geographischen Raum bewegen, in dem diese artspezifisch typischen klimatischen Rahmenbedingungen ihres ‘climate envelope’ herrschen. Verschiebt sich durch Klimawandel der ‘climate envelope’ einer Art, verschiebt sich mit ihm das potentielle Areal dieser Art.

Ist eine Art durch keinerlei Hindernisse in ihrer Ausbreitung beschränkt, kann sie ihr Areal deckungsgleich mit der geographischen Verschiebung ihres 'climate envelope' ändern und nimmt stets den gesamten (prognostizierten) Raum ein, den ihr 'climate envelope' im jeweiligen Klimawandelszenario repräsentiert.

Die meisten Arten unterliegen jedoch nicht nur einer klimatischen Arealbegrenzung sondern auch Ausbreitungshindernissen, z.B. durch unzureichende Fortbewegungsmöglichkeiten bzw. Diasporen-Ausbreitungsmechanismen und / oder ein fragmentiertes Areal, in dem ohne Habitat-Korridore zwischen den getrennten Teilarealen keine kontinuierliche Bewegung möglich ist. Unter diesen Umständen kann eine Art einer Verschiebung ihres 'climate envelope' nicht folgen. Kann sich eine Art nicht oder nicht schnell genug ausbreiten, wird das Areal dieser Art durch die geographische Verschiebung ihres 'climate envelope' im Zuge des Klimawandels zusehends räumlich eingeschränkt und zwar auf den verbleibenden Überlappungsbereich ihres derzeitigen Verbreitungsgebietes mit dem (potentiellen) zukünftigen Verbreitungsgebiet.

3.3.2.2 Modelle und Prognosen zu Arealveränderungen von Lebensgemeinschaften (CMH)

Zahlreiche Untersuchungen in der Klimawirkungsforschung zeigen, daß eine Klimaveränderung sich auf einzelne Arten innerhalb einer Lebensgemeinschaft sehr unterschiedlich auswirken kann und Klimawandel somit auch das (potentielle) Areal für einzelne Arten der gleichen Lebensgemeinschaft in unterschiedlicher Weise verändern kann. Aktuellen Arealveränderungsmodellen auf der Ebene von Lebensgemeinschaften (53) zufolge ist demnach zu erwarten, daß insbesondere eine rasche Arealverschiebung die Auflösung alter Lebensgemeinschaften und das Entstehen neuer Artenverbindungen in sich verschiebenden 'climate envelopes' mit sich bringen werden.

3.4 Sensitivitätsanalyse von Arten und Lebensgemeinschaften - (Themenbereich D)

In der vorliegenden Literaturdokumentation beschäftigen sich 89 Publikationen, das sind knapp 10 % aller Literaturstellen, mit Sensitivitätsanalysen gegenüber Klimaveränderungen bzw. mit Biomonitoring im Zusammenhang mit Klimawandelfolgen.

Dabei wurden in 50 Studien Sensitivitätsanalysen für bestimmte Tier- (18) bzw. Pflanzenarten (32) angestellt. In 36 Veröffentlichungen werden Sensitivitätsanalysen auf der Betrachtungsebene von Lebensgemeinschaften oder Ökosystemen dargestellt. 32 Publikationen setzen sich in allgemeiner Weise mit dem Themenkomplex Biomonitoring und Klimawandelfolgen bzw. mit Beobachtungs-Netzwerken auseinander.

Für eine Analyse der Sensitivität verschiedener Arten, Lebensgemeinschaften oder Ökosysteme gegenüber Klimaveränderungen sind zwei mögliche Herangehensweisen / Ansätze zu unterscheiden:

Zum einen kann auf in der **Klimawirkungsforschung** bereits erlangtes Wissen über das ökologische Verhalten von Arten, Lebensgemeinschaften oder Ökosystemen gegenüber Klimafaktoren zurückgegriffen werden. Dies stellt häufig die Grundlage dar für ein Abschätzen möglicher Auswirkungen von Klimaveränderungen bis hin zu einer konkreten Modellierungen der Klimawandelfolgen für Arten, Lebensgemeinschaften oder Ökosysteme (vgl. Themenbereiche B und C).

Erkenntnisse aus der Klimawirkungsforschung beruhen jedoch meist auf experimentell-manipulativen Untersuchungen, auf Studien an einzelnen Arten ohne Einbeziehen ökosystemarer Wechselwirkungen oder auf einer nur kurz- bis mittelfristigen Beobachtung der Klimawirkung am natürlichen Standort. Sie sind daher nur bedingt geeignet, Aussagen über längerfristige Auswirkungen einer Klimaveränderung im ökosystemaren Gefüge und die Sensitivität von Arten, Lebensgemeinschaften oder Ökosystemen zu machen.

Demgegenüber bietet **Biomonitoring** die Möglichkeit, durch eine mittel- bis langfristige und vergleichende Beobachtung von Reaktionen auf Klimaveränderungen unter natürlichen Bedingungen besonders sensitive Arten, Lebensgemeinschaften oder Ökosysteme als vordringliche Schutzgüter zu identifizieren.

Ein Beispiel hierfür ist das mit EU-Förderung eingerichtete Netzwerk GLORIA (The Global Observation Research Initiative in Alpine Environments) zum Monitoring von Artenveränderungen in hochalpinen Lebensräumen Europas. Im Rahmen des integrativen Programms DIVERSITAS wird von staatlichen wie nicht-staatlichen Wissenschaftsorganisationen auf globaler Ebene ein Netz von Biodiversitäts-Observatorien erstellt, um langfristige Änderungen der Biodiversität und Artenzusammensetzung erkennen zu können.

Im Bereich der Klimafolgenforschung hat sich, insbesondere im europäischen Vergleich, eine besonders hohe Forschungsaktivität in Großbritannien etabliert. Ziel der dort auf nationaler Ebene groß angelegten Modellstudie MONARCH (Modelling Natural Resource Responses to Climate Change) ist, die direkten Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzgüter des Naturschutzes in Großbritannien und Irland abzuschätzen. Dazu wurden für 50 Tier- und Pflanzenarten aus 12 terrestrischen und aquatischen Habitaten die aktuellen Klimaräume (climate envelopes) der betrachteten Arten und Lebensgemeinschaften charakterisiert und deren erwartete Veränderungen bis 2050 prognostiziert. Grundlage dafür waren aktuelle regionalisierte Klimawandelszenarios und eine Integration bekannter Modelle zur Simulation von Abundanz und Areal der betrachteten Arten (SPECIES-Modell: Spatial Estimator of the Climate Impacts on the Envelope of Species).

Dies erlaubte in einer ersten Phase bereits eine Bewertung von Schutzgütern hinsichtlich ihrer Sensitivität gegenüber dem Klimawandel. Bisher nicht berücksichtigt wurden in dieser Studie jedoch wichtige Aspekte wie mögliche ökologische Anpassungsreaktionen der Arten an den Klimawandel, ihre Fähigkeit, durch Migration einer Veränderung ihres jeweils artspezifischen Klimaraums zu folgen sowie zwischenartliche Beziehungen im Ökosystem. Dementsprechend sind für eine zweite Phase des MONARCH- Programms ein Einbeziehen solcher Aspekte in die Modellierung sowie eine Monitoring-Komponente vorgesehen.

Für eine Sensitivitätsanalyse bietet Biomonitoring gegenüber den Ansätzen der Klimawirkungsforschung eine Reihe inhaltlicher Vorteile: Im Rahmen von Biomonitoring werden Klimawan-

delfolgen erkennbar, die sich erst nach längerer Zeit einstellen oder auf komplexen Wechselwirkungen (z.B. Vegetation-Boden-Klima) und zwischenartlichen Beziehungen (trophische Beziehungen, Konkurrenz, Symbiosen) beruhen und deshalb so nur im ökosystemaren Gefüge auftreten.

Dem stehen vor allem Nachteile eines hohen zeitlichen und organisatorischen Aufwands gegenüber: Um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, sind langfristige Untersuchungen (viele Jahre bis Jahrzehnte), eine systematische Konzeption (gezielte Auswahl von Monitoringarten und Lebensräumen nach einheitlichen Kriterien, Beobachtung nach standardisierten Methoden) und eine koordinierte Forschungstätigkeit (Netzwerke) erforderlich.

Um Richtung, Dynamik und Dimension der möglichen Auswirkungen von Klimawandel mit Hilfe von Biomonitoring besser erfassen zu können, ist eine systematische Auswahl und besonders intensive Beobachtung von Indikatorarten geboten. Diese sollten durch schnelle und deutliche Reaktionen in ihrer Phänologie, Abundanz oder Arealveränderung sensibel auf veränderte Klimafaktoren ansprechen, von einer Veränderung anderer Umweltfaktoren wie Nährstoffversorgung, Flächenbewirtschaftung, Schadstoffeintrag jedoch möglichst wenig beeinflusst werden, um so die Einwirkung des Klimawandels klar identifizieren zu können.

Um die Richtung, Dynamik und Dimension von Arealveränderungen durch Klimawandel verfolgen zu können, sollten Monitoring-Arten möglichst geringen Ausbreitungshindernissen unterliegen. Das Habitat einer entsprechenden Monitoring-Art muß also im gegenwärtigen und potentiellen Areal ausreichend und gleichmäßig repräsentiert sein. Die Art sollte zudem über hinreichende Ausbreitungsmechanismen verfügen und somit eine Veränderung ihres potentiellen Areals auch durch ihre tatsächliche Arealveränderung weitgehend widerspiegeln. Sind Klimawandel-Monitoringarten darüber hinaus Repräsentanten wichtiger funktioneller Gruppen in einer Lebensgemeinschaft oder einem Ökosystem, so erlaubt das Erfassen ihrer Reaktion auf Klimaveränderungen ein Abschätzen der Klimawandelfolgen auf wichtige Ökosystemkomponenten und zentrale Prozesse im Ökosystem. Nicht zuletzt sind auch praktische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Eine Monitoring-Art muß leicht zu beobachten und zu identifizieren sein.

In Deutschland bleiben Bestrebungen zu einer Analyse der Sensitivität von Arten und Lebensgemeinschaften gegenüber Klimawandel bisher vorwiegend theoretisch.

So entwickelt etwa Hoffmann (1995) auf Grundlage charakteristischer Zeigerwertspektren und -mittelwerte (Zeigerwerte nach Ellenberg) eine Einordnung der Sensitivität unterschiedlicher Pflanzenformationen bzw. Lebensgemeinschaften oder Ökosysteme. Er identifiziert unter der Annahme einer zukünftigen Temperaturerhöhung und verstärkten Trockenstressbelastung vor allem Pflanzenformationen mit geringen Wärme- und hohen Feuchteansprüchen sowie Ökosysteme, die für ihre Entwicklung lange Zeiträume benötigen, als potentiell besonders klimawandelsensitiv. Letztere dürften sich bei einer raschen horizontalen oder vertikalen Verschiebung der Vegetationszonen im neuen Klimaraum kaum ausreichend schnell regenerieren, um dort mit ihrem charakteristischen Arteninventar weiterbestehen zu können. Neben einer Horizontal- oder Vertikalverschiebung des Areals nach Norden oder in höhere Lagen steht klimawandelsensitiven Arten jedoch noch ein Biotopwechsel als Ausweichmöglichkeit bei einer Klimaveränderung zur Verfügung. Zumindest für einen gewissen Zeitraum können im kleinräumigen Vege-

tationsmosaik Standorte mit mikroklimatisch-hydrologischen Sonderbedingungen einen Puffer gegenüber zonal veränderten Klimabedingungen darstellen.

Ruthsatz (1995) charakterisiert Eigenschaften, die für Pflanzensippen bei einem raschen Klimawandel gute Voraussetzungen für ein Überleben darstellen bzw. eine effektive Arealanpassung erleichtern: Viele regelmäßig und früh im Lebenszyklus produzierte Diasporen mit einer effektiven Ausbreitung, eine weite ökologische Amplitude, hohe Konkurrenzkraft bei der Ressourcenausnutzung, derzeit große und geschlossene Areale sowie eine hohe Abundanz. Arten mit gegenteiligen Eigenschaften wären demnach besonders klimawandel-sensitiv und gefährdet.

Analysen der Klimawandel-Sensitivität auf der Grundlage von Untersuchungen zur Klimaantwort konkreter Arten und Lebensgemeinschaften sowie eine systematische Identifikation von geeigneten Monitoring-Arten und die praktische Anwendung von Biomonitoring zur Erfassung von Klimawandelfolgen sind in Deutschland bisher erst in Ansätzen zu erkennen.

So erarbeiteten etwa Wittig & Nawrath (2000) anhand der Verbreitung, Abundanz und Abundanzveränderung von kühlezeigenden Arten (Zeigerwerte nach Ellenberg) eine grobe Analyse der Gefährdung von Pflanzenarten und Pflanzengesellschaften in Hessen bei einer Temperaturerhöhung. Als besonders klimawandel-sensitiv und gefährdet identifizieren auch sie Pflanzenformationen auf Feuchtstandorten (magere Feuchtwiesen, Großseggenriede, Quellfluren, Feuchtwälder, Moore) sowie montane Stauden- und Fels- und Steinfluren.

Wittig & Nawrath (2000) verweisen auf die große Bedeutung kühlezeigender Pflanzenarten als Bioindikatoren und formulieren den dringenden Bedarf, die Kenntnisse über Zusammensetzung und Verbreitung der Flora, insbesondere kühlezeigender Arten, zu aktualisieren und verdichten. Sie fordern ergänzend die Einrichtung von Biomonitoring-Flächen mit einem hohen Anteil solcher Indikatorarten, um den Prozess klimabedingter Vegetations- und Biotop-Veränderungen zu dokumentieren und geeignete Schutzkonzepte ableiten zu können.

Kesel (2000) stellt ebenfalls auf Grundlage der Temperatur-Zeigerwerte nach Ellenberg ein einfaches floristisch-klimatisches Wanderungsmodell auf und stellt eine Entwicklungsprognose für Nordwest-Deutschland. Er nennt neben zurückgehenden kühlezeigenden Arten des arktisch-alpinen Bereichs als geeignete Indikatoren der Klimaerwärmung auch Arten aus dem submediterranen bis tropischen Florenbereich, deren Artenzahl und Abundanz bereits jetzt erkennbar zunimmt. Als entscheidendes Kriterium für eine Sensitivitäts-Analyse wird darüber hinaus die für Arten bzw. funktionale Gruppen spezifische Wanderungsgeschwindigkeit hervorgehoben. Angesichts der zu erwartenden Klimaänderungen und Klimaraumverschiebungen übersteigen in vielen Fällen die „erforderlichen“ Wanderungsgeschwindigkeiten deutlich die in paläoökologischen Untersuchungen bisher beobachteten und machen so ein Aussterben zahlreicher Arten in Mitteleuropa wahrscheinlich (vgl. Kirilenko & Solomon 1998, Malcolm et al. 2002).

Eine Reihe weiterer Autoren schlagen nach Untersuchungen zur klimabedingten Reaktionen von Arten oder Organismengruppen diese als geeignete Monitoring-Organismen vor.

Frahm & Klaus (2000) beschreiben offensichtlich klimabedingte Arealveränderungen von Moosen und stellen fest, daß sich Moose gegenüber Blütenpflanzen durch Besonderheiten auszeichnen, die sie gerade für das Monitoring von Auswirkungen kurzfristiger Klimaänderungen geeignet machen. Durch enorme Mengen extrem kleiner Sporen und deren Transport auch in höheren

Luftschichten der Atmosphäre besitzen Moose eine hocheffektive Ausbreitung weit über die artspezifische Arealgrenze hinaus. Moose haben kurze Generationszyklen und eine häufig lange Lebensdauer der Sporen. Das erlaubt ein mehrjähriges Überdauern von ungünstigen Bedingungen in der Sporenbank im Boden und ein Auskeimen auch bei seltener auftretenden günstigen Klimabedingungen.

Berger & Walther (2003) weisen auf die Bioindikator-Funktion der Stechpalme (*Ilex aquifolium*) in Mittel- und Nordeuropa hin. Sie beschreiben eine zunehmende Ausweitung des Areals der Stechpalme nach Norden und Osten, die gut einen signifikanten Anstieg der mittleren Temperaturen des kältesten Monats im Gebiet der Arealerweiterung widerspiegelt.

Ott (1996, 2000, 2001) beschreibt die fortschreitende Nord- und Höhen-Ausbreitung und zunehmende Abundanz mediterraner Libellenarten in Deutschland und Europa und hebt die Qualität dieser Arten als ein schnell reagierende Monitororganismen hervor.

Auch phänologische Daten aus den Lebenszyklen von Pflanzen Tieren können zum Biomonitoring von Klimaentwicklungen bzw. Ökosystemveränderungen herangezogen werden, da sie Veränderungen kurzfristig und sensibel widerspiegeln und leicht zu beobachten sind.

So zeigt etwa Dierschke (2000) die Bedeutung symphänologischer Gruppen in der Krautschicht von Kalkbuchenwäldern als präzises Instrument klimatischen Biomonitorings auf.

Gerten (2002) beschreibt klimaabhängige, artspezifische Veränderungen in der Phänologie und Abundanz von Süßwasser-Copepoden als sensible Antwort auf das Maß der Sommerwärme und sieht hierin eine Qualität als Monitoring-Organismen.

4. Bewertung des vorliegenden Wissens

Die erstellte Literaturdatenbank erfaßt mit rund 1000 Zitaten zweifellos nur einen kleinen, jedoch wesentlichen Teil der insgesamt zur Thematik vorliegenden Publikationen. Namentlich in den Themenfeldern „Klimawandel-Szenarien“, „Paläoklimatologie“ und „Wirkungsforschung - erhöhte CO₂-Konzentration“ ist die aktuelle Zahl der Veröffentlichungen erheblich größer als die in der vorliegenden Datenbank enthaltenen Zitate. Die hier in dem gegebenen Zeitrahmen zusammengestellten Publikationen zu den genannten Themenfeldern werden jedoch als richtungsweisend eingeschätzt.

Die gesammelten Publikationen wurden im Hinblick auf Erkenntnisse, die für die Problematik „Klimawandel und Naturschutz in Deutschland“ relevant sind, geprüft. In Kapitel 3 wird eine knappe Übersicht des zu den Themenfeldern A bis D vorliegenden Forschungsstandes gegeben. 40 ausgewählte Publikationen, die als richtungsweisend eingeschätzt werden, sind in Kopie dem Anhang beigelegt worden. Diese Literaturübersicht erlaubt folgende Schlußfolgerungen im Hinblick auf eine Einschätzung des Gefährdungspotentials und den unmittelbaren Handlungsbedarf im Naturschutz in Deutschland:

4.1 Die räumlich expliziten Klimaprognosen sind ausreichend

Die für Deutschland vorliegenden Prognosen der zu erwartenden Veränderungen in Temperaturen und Niederschlägen und deren saisonale Gewichtung in den kommenden 30 bis 50 Jahren sind – ungeachtet der mit allen Szenarien verbundenen Unsicherheit – in räumlicher Hinsicht ausreichend detailliert, daß auf deren Grundlage Gefährdungsanalysen und naturschutzpolitische Handlungsempfehlungen für die Bundesländer, die deutschen naturräumlichen Großlandschaften und spezifische, großräumige Objekte des Naturschutzes entwickelt werden können.

4.2 Erwartete Areal- und Abundanzveränderungen

Basierend auf dem bereits vorliegenden autökologischen und populationsökologischen Wissen über das Verhalten von mitteleuropäischen Pflanzen- und Tierarten gegenüber Temperaturerhöhung, Zunahme der Sommertrockenheit und CO₂-Erhöhung läßt sich vor dem Hintergrund der wahrscheinlichsten Prognosen zu Temperaturerhöhung und sommerlicher Niederschlagsabnahme mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit schlußfolgern, daß ein bedeutender Anteil der heimischen Flora und Fauna einschließlich der heute für den Naturschutz besonders bedeutsamen Arten starke Veränderungen in Häufigkeit und Verbreitungsareal in Deutschland erfahren wird. Diese Veränderungen können je nach physiologischem Konstitutionstyp sowohl Abnahme und regionales Aussterben oder Zunahme bzw. Neueinwanderung bedeuten. Begründete Modellrechnungen prognostizieren für Europa Artenverluste im Bereich von 5 bis 30 %. Diese Sicht erscheint aufgrund des Ausmaßes des prognostizierten Klimawandels gerechtfertigt,

obwohl heute detaillierte aut- und populationsökologische Studien zu fast keiner in Deutschland für den Naturschutz wichtigen Pflanzen- und Tierart vorliegen.

4.3 Hohe zu erwartende Diversitätsverluste

Vor der Prämisse, daß die Klimawandel-Szenarien wahr werden, ist konservierender Naturschutz, der auf überwiegend kleinflächige Schutzgebiete konzentriert ist, mehr oder weniger chancenlos. Diese Einschätzung gilt nicht nur für Deutschland, sondern auch für andere Regionen Europas (z. B. Großbritannien, UK Climate Impacts Programme 2001) wie auch die Tropen mit ihrer ungleich höheren Biodiversität (Thomas et al. 2004).

4.4 Unbefriedigendes Wissen zur Wirkung von Klimaänderungen

Das bisher vorliegende Wissen zur Wirkung von Temperatur-, CO₂- und Bodenfeuchte-Veränderungen auf die deutsche Flora und Fauna betrifft nur in wenigen Fällen Arten, die heute als schutzbedürftig eingestuft werden. Im Falle von krautigen Pflanzen bezieht sich dieses Wissen überwiegend auf Nutzpflanzen oder häufige Wildkräuter. Die Klimasensitivität von heimischen Baumarten wurde fast ausschließlich an Sämlingen oder Jungbäumen erforscht; die Extrapolation dieser Ergebnisse auf alte Bäume und deren Klimasensitivität erscheint problematisch. Ebenso liegen für nur wenige schutzbedürftige Tierarten (hier vor allem für Vögel) aut- und populationsökologische Daten zur Klimasensitivität vor.

4.5 Multiple Stressantworten sind kaum bekannt

Noch limitierter ist unser Wissen über die Antwort von Lebensgemeinschaften oder Ökosystemausschnitten auf erhöhte Temperatur und CO₂-Konzentration und zunehmende Sommertrockenheit. Die Erforschung der komplexen biotischen Interaktionen zwischen den Organismen eines Ökosystems und deren Sensitivität gegenüber Klimaänderungen steht erst am Anfang. Eine wesentliche Forschungslücke betrifft weiterhin die Wirkung von multiplen Faktorenänderungen, also von Temperatur, CO₂-Konzentration und Trockenheit und deren Interaktion, auf heimische Pflanzen und Tiere. Ökosystemantworten auf diese komplexen Veränderungen der Randbedingungen lassen sich nur durch detaillierte Studien an Schlüsselarten des Ökosystems verstehen und vorhersagen. Vielversprechend sind Manipulationsstudien an Ökosystemausschnitten (z. B. Hochmoor- oder Feuchtwiesen-Fluren), in denen die Klimafaktoren langfristig verändert werden. Derartige Studien liegen bisher für gefährdete Lebensräume Deutschlands nicht vor.

4.6 Arealveränderungen sind vergleichsweise gut dokumentiert

Vergleichsweise umfangreich ist das vorliegende Wissen zu rezenten (und historischen) Veränderungen an den Arealgrenzen mitteleuropäischer Pflanzen- und Tierarten. Diese Daten sind von

großem dokumentatorischem Wert, um abgelaufene Veränderungsprozesse zu erfassen. Nachteilig ist, daß meist nur die Vorposten der Areale, nicht aber die Abundanzen innerhalb des Areal, also Häufigkeitsveränderungen, dokumentiert werden. Die Daten sind darüber hinaus in der Regel deskriptiv, d. h. klimatische Ursachen der Arealveränderungen lassen sich bestenfalls aus Korrelationen erschließen, nicht aber mechanistisch aus aut- und populationsökologischen Daten begründen. Damit ist der prognostische Wert dieser Daten zu Arealveränderungen begrenzt, ebenso wie die Übertragbarkeit auf andere, verwandte Tier- und Pflanzenarten. Notwendig erscheint eine Kombination des Wissens über Arealveränderungen mit einschlägigen Daten zur Aut- und Populationsökologie der Arten.

4.7 Das vorliegende Wissen reicht für naturschutzpolitische Handlungsempfehlungen nicht aus

Die in den Punkten 1 bis 6 gegebene Bewertung führt zu der Schlußfolgerung, daß auf der Grundlage des bisher vorliegenden Wissens eine detaillierte Gefährdungsanalyse der naturschutzrelevanten Objekte für Deutschland ad hoc nicht gegeben werden kann. Weder auf Art- noch auf Lebensraumniveau ist bisher systematisch die Wirkung von Temperaturerhöhung und Reduktion des Sommerniederschlags auf die Flora und Fauna Deutschlands und deren Häufigkeit und Verbreitung abgeschätzt worden. Ein besonderer Mangel im bisher vorliegenden Wissen ist in den folgenden Aspekten zu sehen:

- a) Biologische und physikalische Klimafolgenforschung wurde nicht mit dem Ziel durchgeführt, für den Naturschutz relevante Arten und Lebensräume zu betrachten. Viele vorhandene Informationen lassen sich daher nur begrenzt auf die Schutzgüter übertragen.
- b) Die gegenwärtig verfügbaren Daten zur biologischen Wirkung von Klimaänderungen lassen sich nur begrenzt räumlich auswerten. Eine Analyse der Gefährdung von Schutzgütern in bestimmten Naturräumen Deutschlands ist erst möglich, wenn diese biologischen Informationen mit Datensätzen zur Verbreitung gefährdeter Arten und Lebensräume in Deutschland verschnitten werden.

5. Weiterer Forschungs- und Handlungsbedarf

Basierend auf der Literaturrecherche und dem hieraus abgeleiteten Stand des Wissens wird folgender Forschungs- und Handlungsbedarf im Sinne einer langfristigen nationalen Naturschutzstrategie identifiziert.

5.1. Forschungsprogramm: Experimentelle Klimawirkungsforschung

Modellrechnungen zur Auswirkung von Temperaturerhöhung, CO₂-Erhöhung und zunehmender Sommertrockenheit auf mitteleuropäische Pflanzen und Tiere sind nur dann verlässlich, wenn die Parametrisierung auf einer soliden Datengrundlage ruht. Das ist bei den aktuellen Modellen zum Klimaeinfluß auf Verbreitung und Häufigkeit von krautigen Pflanzen und Bäumen oft nicht der Fall.

Es wird hier vorgeschlagen, auf politischer Ebene die Einrichtung eines Schwerpunktforschungsprogramms von Seiten des Bundes (BMBF, BMU, BMVEL, evtl. DFG) und der Länder einzufordern, das in den kommenden Jahren gezielt experimentelle Klimawirkungsforschung an wenigen (10 – 20) ausgewählten Pflanzen, Tieren und Ökosystemen durchführt, die für den Naturschutz und auch die Forstwirtschaft als „Modellorganismen“ bzw. beispielhafte Ökosysteme dienen können. Die Auswahl sollte sich nach Bedrohungsstatus, vermuteter Klimasensitivität und Häufigkeit richten. Die Methoden sollten standardisiert sein und die Umsetzung der Ergebnisse in biologische Klimawirkungsmodelle sichergestellt sein. Die Inhalte und Ziele des Forschungsprogramms sollten in einer interdisziplinären Arbeitsgruppe aus Vertretern des Bundesamtes für Naturschutz, der zu beteiligenden Bundesministerien und der Wissenschaft definiert werden, um den Anwendungsbezug sicherzustellen.

5.2. Erarbeitung einer Gefährdungsanalyse und eines Handlungskonzepts für den Arten- und Lebensraumschutz in Deutschland unter dem Einfluß eines Klimawandels

Die Auswertung der Literaturanalyse hat ergeben, daß mit dem bisher publizierten Wissen zu den biologischen Folgen des Klimawandels in Deutschland eine Sensitivitätsanalyse der Schutzgüter im deutschen Naturschutz nicht möglich ist, weil die bisherigen Forschungsarbeiten andere Ziele verfolgten. Diese Gefährdungsanalyse der Arten und Lebensräume ist jedoch notwendige Grundlage, um dem staatlichen Naturschutz in Deutschland wissenschaftlich begründete Handlungsempfehlungen für die kommenden Dekaden in die Hand geben zu können.

Es wird empfohlen, auf der Grundlage des in der Literaturstudie aufbereiteten Wissens und der im Bundesamt für Naturschutz, anderen staatlichen Einrichtungen der Umweltvorsorge und Universitäten vorhandenen Datensätze zur Biologie, Ökologie und Verbreitung von wichtigen Pflanzen- und Tiergruppen und Ökosystemen eine Studie zum Gefährdungspotential, prioritären

Handlungsbedarf und der notwendigen Vorsorge im Naturschutz in Deutschland anzufertigen. Diese Studie sollte folgende Zielsetzungen verfolgen:

- I) Identifizierung von Lebensgemeinschaftstypen, die durch Temperaturerhöhung und regional zunehmende Sommertrockenheit voraussichtlich zurückgedrängt oder gefördert werden
- II) Identifizierung von Pflanzen- und Tierarten, die durch Temperaturerhöhung und regional zunehmende Sommertrockenheit voraussichtlich zurückgedrängt oder gefördert werden
- III) Erstellung eines Sensitivitätskatasters von wichtigen deutschen Lebensgemeinschaften gegenüber Temperaturerhöhung
- IV) Identifizierung von naturschutzfachlichen Schutzgütern, auf die sich vor dem Hintergrund des Klimawandels Schutzbemühungen in Deutschland konzentrieren sollten
- V) Skizzierung von möglichen naturschutzpolitischen, landschaftstechnologischen und forschungspolitischen Maßnahmen, die für einen zukunftsorientierten Naturschutz erforderlich erscheinen

5.2.1 Gefährdungsanalyse im Hinblick auf den Arten- und Lebensraumschutz in Deutschland

Die Gefährdungsanalyse sollte in zwei Schritten durchgeführt werden:

- I) Analyse von 4 Leitorganismengruppen (Gefäßpflanzen, Moose, Vögel, Heuschrecken) in wenigen Lebensgemeinschaften (ca. 20) ⇒ Punkt 1)
- II) Analyse allein der Gefäßpflanzen und Moose in vielen Pflanzengesellschaften (ca. 50) ⇒ Punkte 2) bis 4)

Die Leitorganismengruppen Gefäßpflanzen, Moose, Vögel, Heuschrecken werden vorgeschlagen, da für diese Gruppen bereits grundlegende Angaben zur Arealgeographie, zur Verbreitung (und Abundanz) in Deutschland (Bundesamt für Naturschutz) und (teilweise) zu den Standortansprüchen existieren.

Methodisch wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1) Temperatur(T)- und Feuchte(F)-Ansprüche der Arten der 4 Leitorganismengruppen in ca. 20 charakteristischen deutschen Lebensgemeinschaften

Die ca. 20 Lebensgemeinschaften sollen durch eine gemeinsame Betrachtung der mittleren T- und F-Werte der 4 verschiedenen Leitorganismengruppen charakterisiert werden.

Die Lebensgemeinschaften (Pflanzengesellschaften) werden nach ihrer Repräsentativität in den Lebensraumtypen Wälder, Ackerland, Grünland, Moore, Gewässerlebensräume, Küstenlebensräume, alpine Lebensräume u.a. ausgewählt.

Für Gefäßpflanzen und Moose von ca. 20 Pflanzengesellschaften sollten nach vorliegendem pflanzensoziologischen Aufnahmestoffmaterial mittlere bzw. mediane Temperatur- und Feuchtezahlen nach Ellenberg errechnet werden.

Darüber hinaus sollen Arealtypenspektren errechnet werden für:

- Pflanzenarten (nach Meusel, Oberdorfer u.a.)
- Vogelmischungen (Basis: Verbreitungskarten und Siedlungsdichte-Untersuchungen)
- Heuschreckengemeinschaften der ausgewählten Lebensräume (soweit nach gegebener Datengrundlage möglich)

Dies geschieht auf der Grundlage vorliegender Verbreitungskarten (Bundesamt für Naturschutz und andere Quellen) und Angaben zu den Arealtypen sowie durch Expertenbefragung.

2) Temperatur(T)- und Feuchte(F)-Ansprüche der Gefäßpflanzen und Moose in rund 50 deutschen Pflanzengesellschaften

Wichtige deutsche Pflanzengesellschaften sollen anhand der mittleren T- und F-Werte ihrer Gefäßpflanzen und Moose charakterisiert werden, um eine Sensitivität von Lebensräumen gegenüber Klimawandel quantifizieren zu können. Auswahlkriterien für ca. 50 wichtige Pflanzengesellschaften sind die Repräsentativität für bestimmte Landschaftsräume, die Flächenausdehnung sowie die Schutzbedürftigkeit.

Für das typische (stetige) Inventar an Gefäßpflanzen und Moosen dieser Pflanzengesellschaften sollen mittlere bzw. mediane Temperatur- und Feuchtezahlen nach Ellenberg errechnet werden basierend auf Vegetationstabellen bei Oberdorfer, Passarge, Dierschke et al. und anderen. Dazu sollen Kältezeiger und / oder Eiszeitrelikte in diesen Pflanzengesellschaften gesondert registriert werden.

3) Abschätzung der räumlichen Verbreitung von Pflanzengesellschaften mit spezifischen Temperatur- und Feuchteansprüchen in Deutschland

Pflanzengesellschaften mit spezifischen T- und F-Werten sollen geographisch und länderspezifisch zugeordnet werden, um eine gegebenenfalls länderspezifische Verantwortlichkeit gegenüber einer möglichen Klimagefährdung zu erkennen.

Das Vorkommen von ca. 50 wichtigen Pflanzengesellschaften und Moossynusien mit spezifischen T- und F-Ansprüchen gemäß 2) in den naturräumlichen und politischen Einheiten Deutschlands soll festgehalten werden. Die räumliche Verbreitung dieser Pflanzengesellschaften soll anhand des gemeinsamen Vorkommens von ausgewählten Kenn- und Differenzialarten grob kartographisch umrissen werden. Grundlage dafür stellen die deutschen Verbreitungsatlanen der Pflanzen dar.

4) Analyse der Beziehungen zwischen den mittleren Temperatur- und Feuchtezahlen von Pflanzengesellschaften und ihrer aktuellen Gefährdung

In diesem Arbeitsschritt soll untersucht werden, in wie weit Klimawandel bereits heute zur Gefährdung bestimmter Pflanzen- und Moosgesellschaften beiträgt. Das geschieht vor dem Hintergrund, daß Lebensraumschwund durch andere anthropogene Einwirkungen in der Regel (noch) bei weitem einflußreicher ist.

Grundlage dafür bilden die Ergebnisse aus 2) und die Roten Listen der Pflanzengesellschaften einzelner Bundesländer bzw. der Bundesrepublik.

5) Erstellung einer einfachen Wärmestufenkarte Deutschlands für die Gegenwart auf pflanzengeographischer Grundlage

Die derzeitige Flächenausdehnung von Gebieten mit Temperaturbereichen gemäß der 10-stufigen T-Skala nach Ellenberg soll grob quantifiziert werden.

Dies kann auf Grundlage von Karten der heutigen Julitemperatur und phänologischer Wärmestufenkarten für einzelne Bundesländer geschehen. Die Zuordnung von absoluten Temperaturen zu den T-Zahlen nach Ellenberg soll anhand der Verbreitung von jeweils mehreren Pflanzenarten mit der betreffenden T-Zahl in einer Abschätzung erfolgen.

6) Erstellung eines Sensitivitätskatasters ausgewählter deutscher Gefäßpflanzen, Moose, Heuschrecken und Vogelarten gegenüber Temperaturerhöhung

Arten, die von einer Erwärmung voraussichtlich besonders betroffen sind, sollen identifiziert werden.

Kriterien für die Auswahl zu untersuchender Arten sind:

- niedrige T-Zahlen der Ellenberg-Werte (Kältezeiger, Glazialrelikte)
- für Tierarten eine Abschätzung von angenäherten T-Werten aus arealgeographischen Informationen
- Abschätzung des potentiellen temperaturbegrenzten Siedlungsareals einer Lebensgemeinschaft bei Erhöhung der T-Zahl in Deutschland um 1 oder 2 Wertestufen.

Gefährdung wird definiert als das Ausmaß der Arealschrumpfung bei Temperaturstufenerhöhung.

7) Erstellung eines Sensitivitätskatasters ausgewählter Pflanzengesellschaften und Moossynusien gegenüber Temperaturerhöhung

Es soll eine Liste von wahrscheinlich besonders von der Erwärmung betroffenen Pflanzengesellschaften und Moossynusien aufgestellt werden. Eine Prioritätenliste für mögliche Schutzmaßnahmen vor dem Hintergrund einer Erwärmung soll erarbeitet werden.

Grundlage dafür sind die Ergebnisse aus 3) und 5) und die Annahme einer Erhöhung der Temperaturzahl in Deutschland um 1 oder 2 Wertestufen basierend auf aktuellen regionalisierten Klimaprognosen. Gefährdung wird definiert als das Ausmaß der Arealschrumpfung bei Temperaturstufenerhöhung.

5.2.2 Prioritäre Maßnahmen im deutschen Naturschutz vor dem Hintergrund eines Klimawandels

8) Skizzierung von Rahmenbedingungen einer nationalen Naturschutzstrategie, die den prognostizierten Klimaänderungen Rechnung trägt

Folgende Zielkriterien für ein mittel- bis langfristiges Schutzgebietssystem sollen erarbeitet werden:

- Größe
- geographische Lage
- im Gebirge: Höhenerstreckung
- Lebensraum-Schwerpunkte
- naturräumliche Schwerpunkte

Datengrundlage dafür bilden die Ergebnisse der Gefährdungsanalyse nach 1) – 7).

5.2.3 Empfehlungen zu vorsorgenden Maßnahmen für einen in Bezug auf den Klimawandel zukunftsorientierten Naturschutz

9) Skizzierung eines standardisierten, gesamtstaatlich repräsentativen Monitoring-Ansatzes für vom Klimawandel bedrohte Schutzgüter (Arten und Lebensräume)

Es soll eine Übersicht über laufende Monitoringprojekte (Bundesamt für Naturschutz, Landesämter, Programme auf europäischer Ebene), deren Zielsetzung und Potential für ein koordiniertes Monitoring-Programm für vom Klimawandel bedrohte Schutzgüter erarbeitet werden.

Grundlage dafür bilden die Ergebnisse aus 1) – 7).

5.2.4 Fachliche Anforderungen an die Studie „Erarbeitung einer Gefährdungsanalyse und eines Handlungskonzeptes für den Arten- und Lebensraumschutz in Deutschland“

Die Erstellung der Studie erfordert Fachkompetenz in den Bereichen Floristik und Faunistik, Vegetationsökologie und Tierökologie und Standortökologie einschließlich Klimatologie, die mit naturschutzfachlichem Wissen zu verknüpfen ist. Als Bearbeiter kommen daher in erster Linie biologische Forschungsinstitute mit breitem floristisch-faunistischem und ökologischem Forschungsprofil in Frage.

Die gesamte für das Vorhaben ausgewertete Literatur kann unter folgender Internetadresse heruntergeladen werden:

[www.floraweb.de/download/literatur klimawandel.pdf](http://www.floraweb.de/download/literatur_klimawandel.pdf)

Literatur

- Allen, M. R. and Ingram, W. J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature* **419**, 224-232.
- Alward, R. D., Detling, J. K., and Milchunas, D. G. (1999). Grassland vegetation changes and nocturnal global warming. *Science* **283**, 229-231.
- Arnott, S. E., Keller, B., Dillon, P. J., Yan, N., Paterson, M., and Findlay, D. (2003). Using temporal coherence to determine the response to climate change in Boreal Shield lakes. *Environmental Monitoring and Assessment* **88**, 365-388.
- Bakkenes M., Alkemade J.R.M., Ihle F., Leemans R., and Latour J.B. (2002). Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology* **8**, 390-407.
- Beckmann, B. R. and Buishand, T. A. (2002). Statistical downscaling relationships for precipitation in the Netherlands and North Germany. *International Journal of Climatology* **22**, 15-32.
- Beebee, T. J. C. (1995). Amphibian Breeding and Climate. *Nature* **374**, 219-220.
- Beniston, M., Keller, F., Tol R.S.J., Delécolle R., Hoermann G., Iglesias A., Innes J., McMichael A.J., Martens W.J.M., Nemesova I., Nicholls R., and Toth F.L. (1998). The regional Impacts of Climate Change: Europe. In "The regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group II" (Watson R.T., Zinyowera M.C., and Moss R.H., Eds.), pp. 149-185. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Berger S. and Walther G.-R. (2003). *Ilex aquifolium* - abioindicator for climate change? *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* **33**, 127.
- Berner, U. and Streif, H. (eds). (2001): Klimafakten: Der Rückblick - Ein Schlüssel für die Zukunft. 3. Auflage. 238 Seiten, Schweizerbart
- Bertness, M. D., Leonard, G. H., Levine, J. M., and Bruno, J. F. (1999). Climate-driven interactions among rocky intertidal organisms caught between a rock and a hot place. *Oecologia-Berlin* **120**, 446-450.
- Bissoli P. (2002). Wetterlagen und Großwetterlagen im 20. Jahrhundert. In "Klimastatusbericht 2001" (Deutscher Wetterdienst, Ed.), pp. 32-40., Offenbach.
- Crawford, R.-M. M. (2000). Ecological hazards of oceanic environments. *New-Phytologist* **147**, 257-281.
- Cubasch U. (1998). Modellierung regionaler Klimaänderungen. In "Warnsignal Klima: wissenschaftliche Fakten ; das Klima des 21. Jahrhunderts" (Lozan J.L., Grassl H., and Hupfer P., Eds.), pp. 170-176., Hamburg.
- Cubasch U. (2003). Perspektiven der Klimamodellierung. In "Klimastatusbericht 2002" (Deutscher Wetterdienst, Ed.), Vol. S, pp. 7-16., Offenbach.
- Dierschke, H. (2000). Phenological phases and phenological species groups of mesic beech forests and their suitability for climatological monitoring. *Phytocoenologia* **30**, 469-476.
- Ehleringer, J. R., Cerling, T. E., and Dearing, M. D. (2002). Atmospheric CO₂ as a global change driver influencing plant-animal interactions. *Integrative and Comparative Biology* **42**, 424-430.
- Frahm J.P. and Klaus D. (2000). Moose als Indikatoren von rezenten und früheren Klimafluktuationen in Mitteleuropa. *NNA Berichte* **13**, 69-75.
- Gerten, D. and Adrian, R. (2002). Species-specific changes in the phenology and peak abundance of freshwater copepods in response to warm summers. *Freshwater Biology* **47**, 2163-2173.
- Hoffmann J. (1995). Einfluß von Klimaänderungen auf die Vegetation von Kulturlandschaften. Bundesamt für Naturschutz. Klimaänderung und Naturschutz. *Angewandte Landschaftsökologie* **4**, 191-212.
- Inouye, D. W. (2000). The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecology Letters* **3**, 457-463.
- Kesel, R. (2000). Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Flora und Vegetation in Nordwestdeutschland. *NNA-Berichte* **13**, 2-12.
- Kirilenko, A. P. and Solomon, A. M. (1998). Modeling dynamic vegetation response to rapid climate change using bioclimatic classification. *Climatic Change* **38**, 15-49.
- Klimastatement 2003 der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG), der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie (ÖGM) und der Schweizerischen Gesellschaft für Meteorologie (SGM) (= Schönwiese C-D.; Bader

- S.; Böhm R.; Claussen M.; Cubasch U; Gärtner U.; Graßl H.; Rahmstorf S.; Sündermann J.; Kromp-Kolb H.; Richner H.]
- Lambeck, K., Tezer, M. E., Potter, E.-K. (2002). Links between climate and sea levels for the past three million years. *Nature* **419**, 199-207.
- Liepert, B. G. (1997). Recent changes in solar radiation under cloudy conditions in Germany. *International Journal of Climatology* **17**, 1581-1593.
- Malcolm, J. R., Markham, A., Neilson, R. P., and Garaci, M. (2002). Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *Journal of Biogeography* **29**, 835-849.
- McKenzie, R. L., Bjorn, L. O., Bais, A., and Ilyasd, M. (2003). Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Photochemical & Photobiological Sciences* **2**, 5-15.
- Menzel, A. (2000). Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology* **44**, 76-81.
- Müller-Westermeier G. (2002). Die mittleren klimatischen Bedingungen Teil (V) - Phänologie und ihre Bedeutung für die Klimaüberwachung. In "Klimastatusbericht 2001" (Deutscher Wetterdienst, Ed.), pp. 195-198., Offenbach.
- Müller-Westermeier G. (2002). Klimatrends in Deutschland. In "Klimastatusbericht 2001" (Deutscher Wetterdienst, Ed.), Offenbach.
- Murphy, J. (2000). Predictions over climatic change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques. *International Journal of Climatology* **20**(5), 489-501.
- Ott J. (1996). Zeigt die Ausbreitung der Feürlibelle in Deutschland eine Klimaveränderung an?: Mediterrane Libellen als Indikatoren für Änderungen in Biozönosen. *Naturschutz und Landschaftsplanung* **28**, 53-61.
- Ott J. (2000). Die Ausbreitung mediterraner Libellenarten in Deutschland und Europa - die Folge einer Klimaveränderung? *NNA-Berichte* **13**, 13-35.
- Ott J. (2001). Expansion of Mediterranean Odonata in Germany and Europe - consequences of climatic changes. In "Fingerprints of Climate Change - Adapted Behaviour and Shifting Species Ranges" (Walther, Burga, and Edwards, Eds.), pp. 89-111. Kluwer Academic / Plenum Publ, New York.
- Rahmstorf, S. (1999). Shifting seas in the greenhouse? *Nature* **399**, 523-523 (+ erratum correction 740).
- Rahmstorf, S. (2002). Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* **419**, 207-214.
- Rahmstorf, S. (2003). The current climate. *Nature* **421**, 699.
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Doscher, R., Graham, L. P., Jones, C., Meier, H. E. M., Samuelsson, P., and Willen, U. (2004). European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics* **22**, 13-31.
- Rapp J. and Schönwiese C.-D. (1996). Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891 - 1990. (5). Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten : Ser. B. Inst.für Meteorologie und Geophysik, Univ. Frankfurt.
- Rapp J. (2002). Regionale Klimatrends in Deutschland im 20. Jahrhundert. In "Klimastatusbericht 2001" (Deutscher Wetterdienst, Ed.), pp. 175-184., Offenbach.
- Ruthsatz B (1995). Welche Naturschutzmaßnahmen lassen sich schon heute aufgrund vermutlicher anthropogener Klimaänderungen empfehlen? Ein Beitrag aus vegetationskundlicher Sicht. *Angewandte Landschaftsökologie* **4**, 213-224.
- Schmith, T. (2001). Global warming signature in observed winter precipitation in Northwestern Europe? *Climate Research* **17**, 263-274.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., de Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L., and Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature* **427**, 145-148.
- Tinz B. (2003). Die Nordatlantische Oszillation und ihr Einfluss auf die europäischen Lufttemperaturen. In "Klimastatusbericht 2002" (Deutscher Wetterdienst, Ed.), pp. 32-41., Offenbach.
- Tryjanowski, P., Rybacki, M., and Sparks, T. (2003). Changes in the first spawning dates of common frogs and common toads in western Poland in 1978-2002. *Annales Zoologici Fennici* **40**, 459-464.
- Weichert, A. and G. Bürger (1998). Linear versus nonlinear techniques in downscaling. *Climate Research* **10**, 83-93.
- Wittig R. and Nawrath S. (2000). Welche Pflanzenarten und -gesellschaften Hessens sind bei einer globalen Temperaturerhöhung gefährdet?: Vorschläge für ein Biomonitoring. *Geobot.Kolloq.* **15**, 59-69.