

**Untersuchung der Arealodynamik des Kurzschwänzigen Bläulings
(*Cupido argiades*, PALLAS 1771) unter Klimawandelbedingungen
mit Artverbreitungsmodellen in Europa
(Lepidoptera: Lycaenidae)**

Katharina J. Filz & Thomas Schmitt

Title: Climate change impacts on the range dynamics of the short-tailed blue (*Cupido argiades*, PALLAS 1771) in Europe

Kurzfassung: Der Klimawandel hat weltweit gravierende Auswirkungen auf die Biodiversität. Besonders wechselwarme Taxa wie Reptilien, Amphibien oder Insekten sind von Veränderungen in Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen stark betroffen. Der Kurzschwänzige Bläuling (*Cupido argiades*) ist eine thermophile Offenlandart, deren rezentes Verbreitungsgebiet weite Teile Europas umfasst und die in ganz Deutschland Ausbreitungstendenzen zeigt. Artverbreitungsmodelle prognostizieren jedoch unter verschiedenen Klimaszenarien (A2a, A1b) des IPCC gravierende Arealverluste über die nächsten Jahrzehnte und eine deutliche Verlagerung klimatisch geeigneter Habitate in Richtung Nordosteuropa und in die Höhenlagen der mitteleuropäischen Gebirgszüge. Folglich ist anzunehmen, dass die aktuell starke Ausbreitung der Art im Saarland und in Rheinland-Pfalz nur vorübergehenden Charakter besitzt. Unsere Studie verdeutlicht somit, dass Veränderungen klimatischer Faktoren wie der jährlichen Temperaturspanne sowie der durchschnittlichen Temperaturen und Niederschlagsmengen der Sommer- und Wintermonate entgegen den allgemeinen Erwartungen in den kommenden Jahrzehnten direkten negativen Einfluss auf das Vorkommen einer rezent weitverbreiteten Art haben könnten.

Abstract: Biodiversity is globally suffering from severe impacts of climate change. Temperature increases and variations in precipitation patterns may especially affect poikilothermic taxa as reptiles, amphibians and insects. Current ranges of the short-tailed blue (*Cupido argiades*) encompass large portions of Europe, and range expansions have been documented at its range border in south-western Germany. However, species distribution models predict a severe habitat loss, and a shift of potentially suitable habitats towards north-eastern Europe and higher altitudes under several IPCC scenarios (A1b, A2a) in the forthcoming decades. Consequently, the currently observed range dynamics in south-western Germany are possibly a temporarily occurring phenomenon. Hence, the model predictions demonstrate that, contrary to expectations, variations in climatic parameters as annual temperature, temperature range and precipitation patterns have long-term negative impacts on the occurrence of a recently widely distributed and dispersing species.

Résumé: Le changement climatique affecte la biodiversité à l'échelle mondiale. La hausse des températures et les changements de précipitations influencent particulièrement les animaux poikilothermes comme les reptiles, les amphibiens et les insectes. L'Azuré du trèfle (*Cupido argiades*) est largement répandu dans toute l'Europe et est en train de se propager rapidement en Allemagne. Cependant, les pronostics concernant sa propagation pour les années 2050 et 2080 prévoient des pertes d'habitat et un déplacement

de ces habitats potentiellement appropriés vers le nord-est de l'Europe et aux altitudes plus hautes. Ainsi, la présence de l'Azuré du trèfle en Rhénanie-Palatinat et en Sarre est probablement seulement temporaire. Nos résultats démontrent que, contrairement aux attentes, des changements climatiques, portant sur la température annuelle ou les températures moyennes ainsi que sur le niveau des précipitations des mois d'été et d'hiver, peuvent influencer négativement la propagation et la présence d'une espèce actuellement largement répandue.

Schlüsselbegriffe: Artverbreitung, Arealverschiebung, Kontinentalität, anthropogener Wandel, Nischenmodell, MAXENT

Keywords: species range, range shift, continentality, anthropogenic change, species distribution model, MAXENT

1 Einleitung

Der anthropogen bedingte Globale Wandel hat weltweit zu Veränderungen und Verschiebungen von Biodiversitätsmustern geführt, die sowohl direkt als auch indirekt die Verbreitung von Arten beeinflussen (PARMESAN et al. 1999). Die durchschnittliche globale Jahrestemperatur ist seit den 1950er Jahren kontinuierlich gestiegen und ein weiterer Temperaturanstieg wird bis 2100 prognostiziert (IPCC 2007). Es wird angenommen, dass wechselwarme Taxa wie Amphibien, Reptilien und Insekten besonders vom Klimawandel betroffen sein werden (FODEN et al. 2008, SETTELE et al. 2008, THOMAS et al. 2010). Erste Studien zeigen bereits weltweit großräumige Habitatverluste, temperaturbedingten physiologischen Stress sowie gravierende Rückgänge in der Artenvielfalt auf der regionalen Ebene, verbunden mit Veränderungen in der Zusammensetzung der Zönosen der genannten Taxa (THOMAS et al. 2004a,b, 2006, DIAMOND et al 2011, PÖYRY et al. 2011).

Die steigende Sorge über die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität hat in den vergangenen Jahrzehnten zum vermehrten Einsatz von Artverbreitungsmodellen (Species distribution models, SDMs) geführt (ARAÚJO et al. 2005, SETTELE et al. 2008). Diese haben sich heute für die räumliche Interpolation ökologischer *in situ*-Beobachtungen als wichtiges Werkzeug etabliert. Hierbei werden, unter Einbeziehung von georeferenzierten Fundpunkten einer Art sowie Topographie, Klima- und Fernerkundungsdaten, räumliche Vorhersagen zur Wahrscheinlichkeit des Vorkommens einer Art getroffen. So können potenzielle Arealveränderungen, biologische Invasionen oder Extinktionsprozesse unter verschiedenen Klimawandelszenarien vorhergesagt werden (RÖDDER et al. 2009, CHING CHEN et al. 2011, IHLOW et al. 2012).

Die vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) für dieses Jahrhundert prognostizierten Veränderungen in Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen lassen gravierende Auswirkungen auf die Verbreitungsmuster vieler Arten erwarten. In Abhängigkeit von ihrer Konkurrenzstärke und ihrer Spezialisierung reagieren einzelne Taxa sehr unterschiedlich auf Klimaveränderungen. In vielen Fällen wird die Ausbreitung einer Art trotz einer Verbesserung der klimatischen Gegebenheiten in einem Gebiet durch die arteigene Dispersionsfähigkeit, Habitatzerstörung und -fragmentierung sowie geographische Barrieren begrenzt. Sofern genügend Zeit für die Kolonisierung bisher nicht besiedelter Bereiche zur Verfügung stand, wurden bereits (schwerpunktmäßig in den gemäßigten Breiten) Arealexpansionen in einem breiten Artenspektrum (Vögel, Schmetterlinge, Libellen) zu den Polen oder in größere Höhenlagen nachgewiesen (PARMESAN et al. 1999, PARMESAN & YOHE 2003). Diese Expansionen werden bisher weitgehend in Verbindung mit den steigenden durchschnittlichen Jahrestemperaturen gesehen.

Der Kurzschwänzige Bläuling (*Cupido argiades*) zeigte von 1950 bis 1990 einen bislang unerklärlichen Rückgang seiner Vorkommen in Deutschland, so dass Populationen der Art Ende des letzten Jahrhunderts nur vereinzelt und stark disjunkt anzutreffen waren, fast ausschließlich in Teilen der Oberrheinebene nördlich des Kaiserstuhls (EBERT & RENNWALD 1991; SETTELE et al. 2009). Seit Beginn der 1990er Jahre zeigt diese polyvoltine und dispersionsfreudige Art jedoch einen starken Ausbreitungstrend. Dies wurde meist im Zusammenhang mit der klimatischen Erwärmung gesehen, kann jedoch nur bedingt durch diesen erklärt werden, da sich die Ausbreitung des Bläulings auch in vergleichsweise kühlen Jahren ungebremst fortsetzt. Auf Basis der bekannten Klimanische des Bläulings haben wir in dieser Studie deshalb Artverbreitungsmodelle erstellt, um sein potenzielles Areal in den Jahren 2030, 2050 und 2080 unter verschiedenen Klimawandelszenarien des IPCC (A1b, A2a) zu skizzieren und die Arealdynamik der Art zu diskutieren und vor allem die mögliche Dynamik dieser Art im Saarland und seinen angrenzenden Gebieten genauer zu beleuchten.

2 Material und Methoden

2.1 *Cupido argiades* (PALLAS, 1771)

Der Kurzschwänzige Bläuling (*Cupido argiades*, Abbildung 1) ist die zweitkleinste Bläulingsart in Deutschland, die sich von anderen heimischen Bläulingsarten deutlich durch die Flügelzipfel und die beiden kräftigen orangefarbenen Randmale auf der Unterseite der Hinterflügel unterscheidet. Diese Wärme liebende Art ist im Sinne von WEIDEMANN (1986) ein Verschiedenbiotopbewohner, der gebüschreiche Strukturen in extensiv genutztem Grünland sowie Bereiche der offenen Kulturlandschaft wie Böschungen, Brachen und Ruderalflächen bevorzugt. Er zeigt eine gewisse Präferenz für feuchte Standorte, ist jedoch auch in trockenen Bereichen bis 1.000 Meter Höhe zu finden (SETTELE et al. 1999).

Sein rezentes Verbreitungsgebiet erstreckt sich vom Norden Spaniens über Mittel-, Süd-, und Osteuropa bis nach Asien und Japan. Im Norden ist die Art vereinzelt im Süden von Schweden und Finnland zu finden. Sie fehlt weitgehend in den Gebieten mit mediterranem Klima, also weiten Teilen Iberiens und Italiens, dem Süden der Balkanhalbinsel und der Türkei (TOLMAN & LEWINGTON 1998). In Deutschland sind Populationen aus der Oberrheinebene, Bayern, Hessen, Sachsen, Brandenburg und Sachsens-Anhalt sowie neuerdings aus dem Saarland und Rheinland-Pfalz bekannt (Tabelle 1). Oft wird angenommen, dass sich die Art als Folge einiger überdurchschnittlich warmer Jahre stark ausbreiten konnte und Bundesländer besiedelte, aus denen Nachweise lange Zeit fehlten (SETTELE et al. 2009). Vor allem das Extremjahr 2003 scheint eine besondere Schlüsselbedeutung in diesem Prozess zu haben. In diesem Jahr stellte die Art ihre Ökologie regelrecht um und wurde an ihren Vorkommen in Baden-Württemberg, an denen sie bis dahin weitgehend eine sesshafte und biotoptreue Art dargestellt hatte, zu einem ausgesprochenen r-Strategen, der sich überall zu reproduzieren versuchte und ein stark ausgeweitetes Spektrum an Eiablagepflanzen nutzte. Ein Zusammenhang mit der Extremwitterung in 2003 muss angenommen werden, da die Art in ihrem Verhalten in den kühleren Folgejahren deutlich unauffälliger war (pers. Mitt. J. HENSELE & E. RENNWALD über S. CASPARI).



Abb. 1: Ein Weibchen des Kurzschwänzigen Bläulings (*Cupido argiades*) bei der charakteristischen Eiablage in ein noch nicht aufgeblühtes Blütenköpfchen des Rotklee (*Trifolium pratense*; Foto: H. Petrischak, Birzberg/Fechingen, 20.8.2010).

Tab. 1: Verbreitung von *C. argiades* in den Bundesländern Deutschlands, inklusive Rote-Liste-Status und Status nach BArtSchV.

	AV	RL	§D
Deutschland	+	V REINHARDT & BOLZ (2011)	N
SH	E	- KOLLIGS (2003)	
HH	-		
MV	x	0 WACHLIN et al. (1993)	
NI	+	= LOBENSTEIN (1986)	
ST	+	0 GROSSER (1993)	
BE	-		
BB	+	1 GELBRECHT & WEIDLICH (1992)	
SN	+	R REINHARDT (2007)	
TH	+	0 THUST et al. (2006)	
HE	E	D KRISTAL & BROCKMANN (1996)	
NW	+	0 LÖLF (1988)	
RP	+	G SCHMIDT (2010)	
SL	+	G CASPARI & ULRICH (2008)	
BW	+	V EBERT et al. (2005)	
BY	+	0 BOLZ & GEYER (2003)	

Aktualität der Vorkommen (AV)

-: kein Vorkommen
o: ausgestorben
x: Fundmeldung 1946-1980
+: Fundmeldung nach 1980
E: Einzelfund(e) nach 1980

Rote-Liste Einstufung (RL)

-: nicht gefährdet
0: ausgestorben
1: vom Aussterben bedroht
2: stark gefährdet
V: Vorwarnliste
D: Daten defizitär
R: seltene Art mit begrenztem Vorkommen
G: Status unbekannt, Gefährdung anzunehmen
=: nicht bewertet

Rechtliche Aspekte (§D)

N: in BArtSchV nicht aufgeführt

2.2 Fundpunkte und Klimadaten

Georeferenzierte Funddaten für die vorliegende Studie wurden aus der Global Biodiversity Information Facility (GBIF, <http://data.gbif.org>), dem Wanderfaltermonitoring (N. HIRNEISEN, pers. Mitteilung) und dem Tagfaltermonitoring Deutschland (S. CASPARI, pers. Mitteilung) sowie LUCHTANOV & LUCHTANOV (1994) entnommen und räumlich gefiltert, um Autokorrelationen zwischen den Punkten zu vermeiden. Insgesamt flossen 1.680 Fundpunkte aus dem rezenten Areal von *C. argiades* in die Studie ein.

Um die Klimanische der Art abzubilden, wurden aktuelle Klimadaten in Form von Bioclim-Variablen mit einer Auflösung von 30 arc-Sekunden (entspricht in Europa einer Kantenlänge der Raster von etwa 900 m) für das rezente Verbreitungsgebiet von *C. argiades* von der WorldClim-Datenbank

bezogen. Die 19 verwendeten Bioclim-Variablen repräsentieren klimatische Mittelwerte für den Zeitraum zwischen 1950 und 2000 (Hijmans et al. 2005) und haben sich bereits innerhalb zahlreicher Modellierungsstudien bewährt (Beaumont et al. 2005). Da die räumliche Autokorrelation der 19 Bioclim-Variablen, d.h. die gegenseitige Beeinflussung der Datenwerte durch die Distanz der Werte zueinander, die Modellqualität beeinflussen kann, wurde mit Hilfe einer Pearson-Korrelation eine Auswahl an Klimavariablen getroffen. Die Korrelation misst den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen, wobei im Falle von deutlichen Autokorrelationen ($r^2 > 0,75$) nachfolgend nur die jeweils die Biologie der Art besser abbildende Variable verwendet wurde. Für unser Modell wurden insgesamt neun Variablen mit ökologischer Bedeutung für das Vorkommen von Tagfaltern ausgewählt. Der endgültige Datensatz beinhaltete die Klimavariablen ‚jährliche Mitteltemperatur‘ (bio1), ‚jährliche Temperaturspanne‘ (bio7), ‚mittlere Temperatur des wärmsten Quartals‘ (bio 10), ‚mittlere Temperatur des kältesten Quartals‘ (bio 11), ‚jährlicher Niederschlag‘ (bio12), ‚Niederschlag des feuchtesten Quartals‘ (bio16), ‚Niederschlag des trockensten Quartals‘ (bio17), ‚Niederschlag des wärmsten Quartals‘ (bio18), ‚Niederschlag des kältesten Quartals‘ (bio19).

Klimadaten für die Jahre 2030, 2050 und 2080 wurden mit einer Auflösung von 2,5 arc-Minuten über das globale Klimamodell (GCM, general circulation model) ‚HadCM3‘ (Hadley Centre Coupled Model, version 3) des Hadley Centers in Großbritannien bezogen. Die gleichen Bioclim-Variablen wie oben beschrieben wurden verwendet, um Artverbreitungsmodelle für die Klimaszenarien (SRES) A1b und A2a zu erstellen. Grundsätzliche Annahmen des Szenarios A1b sind ein mittlerer Anstieg der CO₂-Emissionen bis 2100 bei einem maximalen Energiebedarf, rasches Bevölkerungswachstum, zunehmende kulturelle und soziale Interaktion, schnelles Wirtschaftswachstum und Entwicklung neuer, effizienterer Technologien sowie ein ausbalancierter Verbrauch aller zur Verfügung stehenden Energieressourcen. Die globale Durchschnittstemperatur steigt in diesem Szenario um rund 2,8°C (1,7-4,4°C) bis 2100. Im Gegensatz dazu setzt Szenario A2a eine sehr heterogene Welt mit stetigem Bevölkerungswachstum und großen regionalen Unterschieden in Wirtschaft und Entwicklung voraus. Im Vergleich zu anderen Szenarien-Familien schreiten das Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum und technologische Fortschritte langsamer voran. Die globale Durchschnittstemperatur steigt in diesem Szenario um rund 3,4°C (2,0-5,4°C) bis 2100 (IPCC 2007).

2.3 Artverbreitungsmodelle

Aktuelle mathematische Algorithmen zur Berechnung von Artverbreitungsmodellen greifen den empirischen Zusammenhang zwischen georeferenzierten Fundpunkten einer Art und den Umweltvariablen am Fundort auf, um die Klimanische einer Art zu quantifizieren und in den geographischen Raum zu projizieren. Wir haben uns für einen Maximum-Entropy-Ansatz entschieden und mit dem Programm MAXENT Version 3.3.3.v auf Basis der gewählten Klimavariablen und georeferenzierten Präsenzangaben des Bläulings Verbreitungsmodelle für die gewünschten Zeiträume erstellt (für eine detaillierte Beschreibung des Modellalgorithmus siehe Phillips et al. 2006, Elith et al. 2011). 25% der Fundpunkte wurden bei jeder Modellierung als Testdaten genutzt, um in einem weiteren Rechenschritt die Qualität des Modells zu bemessen (Phillips et al. 2006). Diese wurde über den AUC-Wert (Area under the receiver operation characteristic curve) bestimmt. Dieser Wert variiert nach der Klassifikation von Swets (1988) zwischen 0,5 (keine Vorhersagekraft des Modells) und 1,0 (sehr gute Vorhersagekraft des Modells) und definiert die Fehlerrate des Algorithmus. Die Software liefert als Resultat eine Karte, die die Wahrscheinlichkeit für das potenzielle Vorkommen der Art in einem bestimmten Gebiet darstellt. Die relative Eignung jeder Rasterzelle als Habitat wird dabei mit Werten zwischen 0 und 1 dargestellt. Eine potenzielle Habitategignung wurde für *C. argiades* ab einem berechneten Schwellenwert von 0,002 angenommen.

3 Ergebnisse

Unter rezenten klimatischen Bedingungen bilden die Modellergebnisse die heutige bekannte Verbreitung von *C. argiades* gut ab (Abbildung 2). Die modellierte Arealgrenze umfasst weitestgehend alle in Europa rezent bekannten Vorkommen des Bläulings. Weiterhin decken sich die vorhergesagten Gebiete mit hoher klimatischer Habitateignung in Nordspanien, Frankreich, dem Alpenvorraum, dem Balkan und Osteuropa mit bekannten Vorkommen der Art in diesen Regionen. Besonders hohe Maxent-Werte treten in der Schweiz und in Österreich nördlich des Alpenhauptkamms sowie am südlichen Alpenrand im Tessin, in Norditalien, Österreich und Slowenien auf. In Deutschland liegt der Verbreitungsschwerpunkt der Art in Baden-Württemberg (Oberrheinische Tiefebene), Bayern und Hessen sowie in Sachsen und Niedersachsen. In Rheinland-Pfalz und dem Saarland erreicht der Bläuling zurzeit potenziell seine nordwestliche Arealgrenze. Diese Modellergebnisse decken sich sehr gut mit dem bekannten Verbreitungsgebiet der Art, die in diesen Regionen zurzeit eine Grenze kontinuierlicher Verbreitung mit starken Populationen erreicht.

Das Modell hat mit einem AUC-Wert von 0,942 nach der Definition von SWETS (1988) exzellente Vorhersagekraft. Den größten Erklärungsanteil für die rezente und zukünftige Verbreitung von *C. argiades* hatten die Klimavariablen ‚jährliche Temperaturspanne‘ (bio7), ‚mittlere Temperatur des kältesten Quartals‘ (bio 11), ‚Niederschlag des trockensten Quartals‘ (bio17) und ‚Niederschlag des wärmsten Quartals‘ (bio18). Obwohl aus einigen Regionen keine georeferenzierten Fundpunkte in das Modell einfließen konnten, wird die Art weitestgehend flächendeckend in ihrem Areal vorhergesagt. Darüber hinaus werden einige potenzielle Verbreitungsgebiete angezeigt, aus denen zurzeit kein Artnachweis vorliegt (z.B. Apenninen, Dänemark).

Die potenzielle Verbreitung der Art verändert sich in allen berechneten Szenarien unter alleiniger Berücksichtigung klimatischer Parameter in der Zukunft stark. Projiziert man das unter rezenten Klimabedingungen entwickelte Modell auf die Klimawandelszenarien A1b und A2a für die Jahre 2030, 2050 und 2080, zeigt sich, dass die Gesamtfläche des europäischen Verbreitungsgebiets tendenziell abnimmt und sich zudem deutlich in nordöstlicher Richtung verschiebt (Abbildung 2). Außerdem wird eine Verlagerung günstiger Habitate in höhere Lagen prognostiziert. Bereits für 2030 sagen die Modelle eine Reduktion der Vorkommen von *C. argiades* in Spanien und Frankreich auf die Höhenlagen der Pyrenäen, der Vogesen, der Alpen und des Zentralmassivs voraus. Zudem wird auf der Balkanhalbinsel und am Südalpenrand ein deutlicher Verlust heute potenziell günstiger Regionen wahrscheinlich.

Gebiete mit bester klimatischer Eignung werden für das Jahr 2030 für die beiden untersuchten Klimawandelszenarien am nördlichen Alpenrand vorhergesagt. Eine Arealerweiterung ist jedoch in Belgien, im Süden Skandinaviens, im nördlichen Polen und im Baltikum potenziell möglich. Zunehmend günstige Habitatbedingungen prognostizieren die Modelle zudem im Erzgebirge, dem Böhmerwald, in den Sudeten, auf der Böhmischemährischen Höhe und in den Karpaten. Auch in der Mitte Deutschlands werden von den Modellen zunehmend Habitate als klimatisch günstig ausgewiesen. Hier zeigen die Modelle weiterhin günstige klimatische Voraussetzungen für ein zusammenhängendes Areal von *C. argiades* in Bayern, Teilen Baden-Württembergs, Hessen, Thüringen, Sachsen und Niedersachsen. Jedoch verschiebt sich die Arealgrenze der Art innerhalb Deutschlands auch nach Osten. Folglich sind im Jahr 2030 im Saarland und in Rheinland-Pfalz voraussichtlich nur noch wenige Standorte klimatisch für den Bläuling geeignet.

Bei der Betrachtung der beiden Zukunftsszenarien im Jahr 2050 macht sich erneut ein deutlicher Verlust potenzieller Habitate am südlichen und westlichen Arealrand von *C. argiades* bemerkbar. Im Szenario A1b sind der zu erwartende Arealverlust und die Verlagerung günstiger Habitate nach Norden noch eindeutiger als unter den A2a-Annahmen. Weite Teile Südskandinaviens und des Baltikums werden als potenziell günstige Habitate vorhergesagt, während in Südeuropa unter beiden Szenarien nur noch

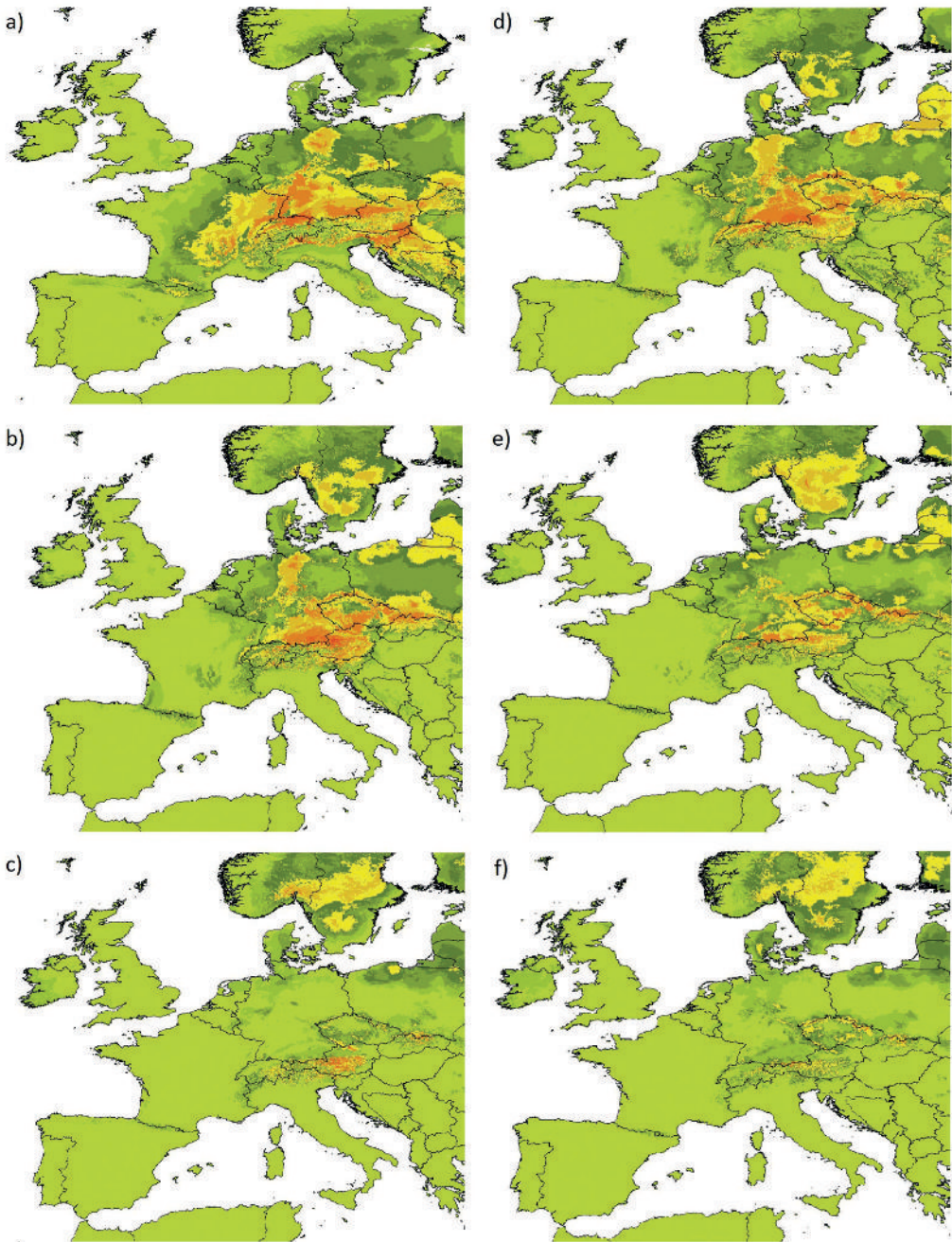


Abb. 2: Potenzielle Verbreitung von *Cupido argiades* unter alleiniger Berücksichtigung klimatischer Parameter in Europa:

a) heute, b) 2050 A2a-Szenario, c) 2080 A2a-Szenario, d) 2030 A1b-Szenario, e) 2050 A1b-Szenario, f) 2080 A1b-Szenario. Wärmere Farben indizieren eine höhere klimatische Habitataignung.

disjunkte Restareale in den Pyrenäen und in den Gebirgen der Balkanhalbinsel zu finden sind. Auch in Ostmitteleuropa wird ein Rückzug potenzieller Vorkommen des Bläulings in höhere Lagen des Erzgebirges, des Böhmerwaldes, der Sudeten, der Böhmischo-Mährischen Höhe und der Karpaten wahrscheinlich.

Weiterhin werden Gebiete im nördlichen Alpenraum als Regionen mit höchster klimatischer Habitateignung prognostiziert. Die Vorhersagen für Deutschland weichen jedoch zwischen den beiden Zukunftsszenarien stark voneinander ab. Beide Modelle weisen das Voralpenland, Teile des Oberrheingrabens, den Schwarzwald, den Harz, den Thüringer Wald, das Fichtelgebirge, den Bayrischen Wald sowie vereinzelte Regionen Mitteldeutschlands als klimatisch günstige Habitate aus. Im A1b-Szenario beschränkt sich die Verbreitung des Bläulings nördlich der Donau jedoch auf einige wenige Höhenlagen, während ein großer Arealverlust im Tiefland vorhergesagt wird. Unter A2a-Annahmen bleiben hingegen, unabhängig von der Topographie, großflächig weite Teile des für 2030 prognostizierten Areals in Norddeutschland, Hessen, Bayern und Sachsen erhalten. Im Saarland und in Rheinland-Pfalz werden nur vereinzelte Habitate in Eifel und Hunsrück als klimatisch günstig ausgewiesen.

Die Projektionen der beiden Zukunftsszenarien für das Jahr 2080 unterscheiden sich nicht erheblich. Die prognostizierten Kerngebiete des Areals von *C. argiades* in Europa liegen im südöstlichen Skandinavien, Südfinnland, dem Baltikum, dem östlichen Alpenraum, dem Erzgebirge, den Sudeten, dem Zelezné Gebirge (zentraler Teil der Böhmischo-Mährischen Höhe) und der Tatra. Die höchste klimatische Habitateignung wird dabei für Gebiete im östlichen Alpenraum und den Karpaten vorhergesagt. Rezente Habitateignungen in Süd-, West- und Südosteuropa dürften unter diesen Szenarien vollständig erlöschen. Auch in Deutschland sind voraussichtlich im Jahr 2080 nur noch vereinzelte Reliktpopulationen im Alpenvorland, dem Erzgebirge, dem Harz und dem Thüringer Wald zu finden. Alle Zukunftsmodelle weisen mit AUC Werten zwischen 0,941 und 0,942 exzellente Vorhersagekraft auf.

4 Diskussion

Der Vergleich der prognostizierten Verbreitung unter rezenten klimatischen Bedingungen mit der realen Verbreitung von *C. argiades* zeigt, dass die errechneten Artverbreitungsmodelle für den Untersuchungsraum realistische Annahmen bezogen auf die zukünftigen Verbreitungsmuster machen. Einzig wenige Gebiete, aus denen wenige bis keine georeferenzierten Fundpunkte für das Modell zur Verfügung standen, wurden unzureichend wiedergegeben (zum Beispiel Teile des Karpatenbeckens). Das Fehlen einer Art in Regionen, die das Modell als potenziell günstige Habitate einstuft, kann generell durch den negativen Einfluss von biotischen Interaktionen, eine limitierende Ausbreitungsfähigkeit oder das Fehlen geeigneter Mikrohabitats erklärt werden (SOBERÓN & PETERSON 2005, SOBERÓN 2007, BROOKER et al. 2006), wobei die beiden letztgenannten wohl für *C. argiades* ausgeschlossen werden können.

Cupido argiades zeigt aktuell in der Südhälfte Deutschlands eine weitgehend flächendeckende Verbreitung, was auch von unserem Modell fast deckungsgleich vorausgesagt wird. Über die vergangenen Jahre wurden immer wieder regionale Ausbreitungswellen, jedoch auch Rückgänge der Art festgestellt (SETTELE et al. 2009), wobei jedoch die Phasen vor und nach 2003 differenziert gesehen werden müssen. Vor diesem Zeitpunkt sind beispielsweise die Fundstellen der Art im Oberrheingraben seit 1980 deutlich zurückgegangen, während gleichzeitig eine Ausbreitungstendenz in östlicher Richtung festzustellen war (EBERT 1991). Seit dem Hitzejahr 2003 kam es jedoch ausschließlich zu Ausbreitungen (S. CASPARI, schriftl. Mitt.). *C. argiades* ist nach der Klassifikation von BINK (1992) ein Binnenwanderer, der regelmäßig Wanderflüge über kurze bis mittlere Distanzen unternimmt. Das ökologische Verhalten der Art während dieser Ausbreitungswellen wird derzeit näher untersucht.

Der Falter ist ein thermophiler Offenlandbewohner, der jedoch keine speziellen Ansprüche an sein Habitat stellt; er fliegt in offenem Grasland, lichten Wäldern sowie auf Ruderalstellen (SETTELE et al. 1999). Erste Beobachtungen zeigen, dass die Art während der expansiven Phase der Ausbreitung ihre Habitate

opportunistisch wählt, während in der sich anschließenden stationären Phase eine deutlich selektivere Habitatwahl dominiert (pers. Mitt. J. HENSLE durch S. CASPARI). Im Zuge der (Re-)Kolonisierung neuer Habitats scheint der Bläuling schrittweise die für ihn günstigen Habitats zu besiedeln. Bisher sind kaum Vorkommen außerhalb des prognostizierten Vorkommens in Deutschland bekannt, was auf eine klimatische Limitierung in diesen Bereichen schließen lässt. Gründe für die Rückgänge oder das bisherige Fehlen der Art in weiten Teilen Deutschlands können auf Basis der klimatischen Einnischung und der Mobilität des Falters nicht benannt werden. Jedoch können der Einfluss biotischer Interaktionen sowie unterschiedlicher Landschaftsparameter nicht ausgeschlossen werden. Letzteres ließe sich in einem weiteren Schritt durch die Verschneidung der Artverbreitungsmodelle mit Landschaftsvariablen untersuchen (HUWYLER et al. 2012).

Bemerkenswert ist die Zusammensetzung der Klimavariablen, die den höchsten Erklärungsgehalt im Modell besitzen. Diese klimatischen Faktoren beeinflussen das Vorkommen von Tagfaltern sowohl direkt wie auch indirekt (DENNIS 1993). So haben hohe Sommerniederschläge meist einen deutlich negativen Einfluss auf das Vorkommen von Tagfalterarten, während gleichzeitig oft eine ökologische Abhängigkeit von den Temperaturen im wärmsten und kältesten Quartal besteht (SETTELE et al. 1999). Im vorliegenden Fall weisen neben den genannten Klimaparametern auch die jährliche Temperaturspanne sowie die Winterniederschläge hohen Einfluss auf die Artverbreitung auf.

Die rezente Verbreitung von *C. argiades* umfasst in weiten Teilen Regionen mit kontinentalen Klimaten, d.h. mit trocken-kalten Wintern und trocken-heißen Sommern. In Regionen mit kühlem und stark atlantisch geprägtem Klima sowie in Winterregenklimaten kommt die Art rezent nur auf Sonderstandorten vor. Da Deutschland zurzeit eine Übergangsregion zwischen atlantisch und kontinental geprägten Klimaten darstellt, ist hier aktuell das Vorkommen des Bläulings regional möglich. Auch die Ergebnisse der Modellierungen unter zukünftigen Klimaszenarien zeigen eine hohe Übereinstimmung der prognostizierten Verbreitung von *C. argiades* mit den dann kontinental geprägten Gebieten Europas. Ein möglicher zukünftiger Rückzug der Art aus dem Westen Europas, und in diesem Zusammenhang auch weitgehend aus dem Saarland und angrenzenden Regionen, dürfte zu einem großen Teil in der zunehmenden Atlantisierung des Klimas begründet sein, was sich durch die überdurchschnittlich milden Winter der letzten Jahre deutlich abzeichnet.

Betrachtet man die Zukunftsmodelle, so wird ab 2030 unter beiden Klimaszenarien eine deutliche Verlagerung des Habitats in Richtung Nordosten und in höhere Lagen erkennbar. Dem IPCC (2007) zufolge ist es wahrscheinlich, dass der Klimawandel in Deutschland zu steigenden Jahresdurchschnittstemperaturen und in Folge auch zu heißeren, trockeneren Sommern führt. Zudem werden auch höhere Durchschnittstemperaturen in den Wintermonaten sowie verstärkte Winterregenfälle prognostiziert. Generell kann vor allem durch die Verringerung der jährlichen Temperaturamplitude von einer ‚Atlantisierung‘ des Klimas in West- und Mitteleuropa ausgegangen werden.

Aus den Modellen ist abzuleiten, dass die Veränderung in der jährlichen Temperaturspanne sowie die erhöhten Temperaturen und Niederschlagsmengen in den Wintermonaten zu einem weitgehenden Erlöschen der Populationen von *C. argiades* in diesen Regionen führen könnten. Andererseits ist jedoch eine Etablierung der Art in Südkandinavien und dem Baltikum nicht unwahrscheinlich, zumal dort schon rezent Einzelfunde nachgewiesen wurden (TOLMAN & LEWINGTON 1998). Im Laufe der Zeit ist dem Modell zu Folge jedoch auch dort ein Rückzug der Art in kontinental geprägte Regionen südöstlich der Skanden, ins nördliche Baltikum und nach Südfinnland zu erwarten.

Für Mittel- und Osteuropa prognostizieren unsere Modelle, dass zukünftig lediglich noch vereinzelt Populationen in den kalt-gemäßigten Höhenlagen der Alpen, der östlichen Mittelgebirge und der Tatra auftreten werden. Vorkommen von *C. argiades* sind aktuell bis 1.000 m Höhe bekannt (TOLMAN & LEWINGTON 1998). Höhenlagen deutlich oberhalb dieser Marke werden wahrscheinlich auch in Zukunft nicht von der Art besiedelt werden. Es ist anzunehmen, dass eine vertikale Verbreitungsgrenze auch zukünftig durch klimatische Limitierungen bestehen bleiben wird. Das derzeit stark zunehmende und

gehäufte Auftreten des Kurzschwänzigen Bläulings im Saarland und den angrenzenden Regionen könnte somit nur eine Art „Gastspiel“ sein, das schon in den nächsten Jahrzehnten auch aus klimatischen Gründen in unserer Region zu Ende gehen könnte.

5 Danksagung

Wir danken der Friedrich-Ebert-Stiftung für die finanzielle Unterstützung der Arbeit. Norbert Hirneisen und Steffen Caspari danken wir für die Bereitstellung von georeferenzierten Funddaten sowie für hilfreiche Anmerkungen zu Freilandbeobachtungen im Saarland. Zudem sei Steffen Caspari und Hannes Petrischak für die kritische Begutachtung des Manuskripts gedankt.

6 Literatur

- ARAÚJO, M.B., PEARSON, R.G., THUILLER, W. & ERHARD, M. (2005): Validation of species-climate impact models under climate change. - *Global Change Biology* **11**: 1504-1513.
- BINK, F.A. (1992): *Ecologische Atlas van de Dagvlinders van Noordwest-Europa*. - Schuyt & Co. Uitgevers en Importeurs, Haarlem.
- BEAUMONT, L. J., HUGHES, L. & POULSEN, M. (2005): Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions. - *Ecological Modelling* **186**: 250-269.
- BROOKER, R.W., TRAVIS, J.M.J., CLARK, E.J. & DYTAM, C. (2006): Modelling species' range shifts in a changing climate: The impacts of biotic interactions, dispersal distance and the rate of climate change. - *Journal of Theoretical Biology* **245**: 59-65.
- CHING CHEN, I., HILL, J.K., OHLEMÜLLER, R., ROY, D.B. & THOMAS, C.D. (2011): Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. - *Science* **333**: 1024-1026.
- DENNIS, R.L.H. (1993): *Butterflies and climate change*. - Manchester University Press, Manchester, UK, 302 S.
- DIAMOND, S.E., FRAME, A.M., MARTIN, R.A. & BUCKLEY, L.B. (2011): Species' traits predict phenological responses to climate change in butterflies. - *Ecology* **92**: 1005-1012.
- ELITH, J., PHILLIPS, S.J. & HASTIE, T. (2011): A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. - *Diversity and Distribution* **17**: 43-57.
- EBERT G. & RENNWALD E. (eds.) 1991: *Die Schmetterlinge Baden-Württembergs*, Band 1 und 2. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- EBERT, G. (1991): *Die Schmetterlinge Baden-Württembergs*, Bd. 2 Tagfalter II. - Ulmer, Stuttgart, 534S.
- EBERT, G., HOFMANN, A., MEINEKE, J.-U., STEINER, A. & TRUSCH, R. (2005): Rote Liste der Schmetterlinge (Macrolepidoptera) Baden-Württembergs (3. Fassung) - in: EBERT, G. (Hrsg.) *Die Schmetterlinge Baden-Württembergs*, Band 10 (Ergänzungsband): 110-133. Stuttgart (Ulmer).
- FODEN, W., MACE, G., VIÉ, J.-C., ANGULO, A., BUTCHART, S., DEVANTIER, L., DUBLIN, H., GUTSCHE, A., STUART, S. & TURAK, E. (2008): Species susceptibility to climate change impacts. - In: Vié, J.-C., Hilton-Taylor, C. & Stuart, S.N. (eds). *The 2008 Review of The IUCN Red List of Threatened Species*. IUCN Gland, Switzerland.
- GELBRECHT, J. & WEIDLICH, M. (1992): Rote Liste der Großschmetterlinge (Macrolepidoptera). - In: Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung (Hrsg.): *Rote Liste. Gefährdete Tiere im Land Brandenburg*: 97-105, Potsdam.
- GROSSER, N. (1993): Rote Liste der Schmetterlinge des Landes Sachsen-Anhalt (1. Fassung). - *Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt* **9**: 60-72.

- HUMANS, R.J., CAMERON, S.E., PARRA, J.L., JONES, P.G. & JARVIS, A. (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. - *International Journal of Climatology* **25**: 1965-1978.
- HUWYLER, S., PLATTNER, M. & ROTH, T. (2012): Modellierung der Tagfaltervielfalt im Schweizer Alpenraum: Mehr als ein Drittel der Tagfalter-Hot-Spots liegt in gesetzlich geschützten Trockenwiesen. - *Natur und Landschaft* **7**: 298-305.
- IHLOW, F., DAMBACH, J., ENGLER, J.O., FLECKS, M., HARTMANN, T., NEKUM S., RAJAEI, H. & RÖDDER, D. (2012): On the brink of extinction? How climate change may affect global chelonian species richness and distribution. - *Global Change Biology* **18**: 1520–1530.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE FOURTH ASSESSMENT REPORT (AR4) ON CLIMATE CHANGE (2007): Impacts, Adaptation and Vulnerability (eds Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E.). - Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KOLLIGS, D. (2003): Schmetterlinge Schleswig-Holsteins. Atlas der Tagfalter, Dickkopffalter und Widderchen, 2. Aufl., Neumünster.
- KRISTAL, P.M. & BROCKMANN, E. (1996): Rote Liste der Tagfalter (Lepidoptera: Rhopalocera) Hessens (2. Fassung). - Hessisches Ministerium des Inneren und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz, Wiesbaden.
- LOBENSTEIN, U. (1986): Rote Liste der in Niedersachsen und Bremen gefährdeten Großschmetterlinge im Gesamtartenverzeichnis (2. Fassung). - Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen **24**: 165-196.
- LÖLF (1988): Rote Liste der in Nordrhein-Westfalen gefährdeten Schmetterlinge (Lepidoptera). - Schriftenreihe der Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-Westfalen (Recklinghausen) **4**: 170-190.
- LUCHTANOV, V.A. & LUCHTANOV, A.G. (1994): Die Tagfalter Nordwestasiens: (Lepidoptera, Diurna) - Herbiopolianna, Buchreihe zur Lepidopterologie Bd.3, Marktleuthen, 440 S.
- PARMESAN, C., RYRHOLM, N., STEFANESCU, C., HILL, J.K., THOMAS, C.D., DESCIMON, H., HUNTLEY, B., KAILA, L., KULLBERG, J., TAMMARU, T., TENNENT, W.J., THOMAS, J.A. & WARREN, M. (1999): Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. - *Nature* **399**: 579-583.
- PARMESAN, C. & YOHE, G. (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. - *Nature* **421**: 37–42.
- PHILLIPS, S.J., ANDERSON, R.P. & SCHAPIRE, R.E. (2006): Maximum entropy modeling of species geographic distributions. - *Ecological Modelling* **190**: 231-259.
- POÛRY, J., LEINONEN, R., SÖDERMAN, G., NIEMINEN, M., HEIKKINEN, R.K. & CARTER, T.R. (2011): Climate-induced increase of moth multivoltinism in boreal regions. - *Global Ecology and Biogeography* **20**: 289–298.
- REINHARDT, R. (2007): Rote Liste Tagfalter Sachsens, 3. Aufl., Dresden.
- REINHARDT, R. & BOLZ, R. (2011): Rote Liste und Gesamtartenliste der Tagfalter (Rhopalocera) (Lepidoptera: Papilionoidea et Hesperioidea) Deutschlands. - *Naturschutz und Biologische Vielfalt* **70** (3): 167-194.
- RÖDDER, D., SCHMIDTLEIN, S., VEITH, M. & LÖTTERS, S. (2009): Alien invasive Slider turtle in unpredicted habitat: a matter of niche shift or predictors studied? - *PLoS ONE* **4**, e7843
- SCHMIDT, A. (2010): Die Großschmetterlinge (Macrolepidoptera s.l.) des Landes Rheinland-Pfalz. Standard-Faunenliste mit integriertem Rote Liste-Vorschlag. - *Melanargia* **22**: 121-277.
- SETTELE, J., FELDMANN, R. & REINHARDT R. (1999): Die Tagfalter Deutschlands – Ein Handbuch für Freilandökologen, Umweltpfleger und Naturschützer. - Ulmer, Stuttgart, 452 S.

- SETTELE, J., KUDRNA, O., HARPKE, A., KÜHN, I., VAN SWAAY, C., VEROVNIK, R., WARREN, M., WIEMERS, M., HANSPACH, J., HICKLER, T., KÜHN, E., VAN HALDER, I., VELING, K., VLIEGENTHART, A., WYNHOFF, I. & SCHWEIGER, O. (2008): Climatic Risk Atlas of European Butterflies. *Biorisk* 1 (Special Issue): 1–710. – Pensoft, Sofia & Moskau.
- SETTELE, J., STEINER, R., REINHARDT, R., FELDMANN, R. & HERMANN G. (2009): Schmetterlinge - Die Tagfalter Deutschlands. - Ulmer, Stuttgart, 256 S.
- SOBERÓN, J. & PETERSON, A.T. (2005): Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. – *Biodiversity Informatics* 2: 1–10.
- SOBERÓN, J. (2007): Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. – *Ecology Letters* 10: 1115–1123.
- SWETS, J.A. (1988): Measuring the accuracy of diagnostic systems. - *Science* 240: 1285-1293.
- 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., TOWNSEND PETERSON, A., PHILLIPS, O.L., WILLIAMS, S.E. (2004a): Extinction risk from climate change. - *Nature* 427: 145-148.
- THOMAS, J.A., TELFER, M.G., ROY, D.B., PRESTON, C.D., GREENWOOD, J.J.D., ASHER, J., FOX, R., CLARKE, R.T., LAWTON, J.H. (2004b): Comparative losses of British butterflies, birds and plants and global extinction crisis. - *Science* 303: 1879-1881.
- THOMAS, C.D., FRANCO, A.M.A., HILL, J.K. (2006): Range retractions and extinction in the face of climate warming. - *Trends in Ecology and Evolution* 21: 8, 415-416.
- THOMAS, C.D., HILL, J.K., ANDERSON, B.J., BAILEY, S., BEALE, C.M. et al. (2010): A framework for assessing threats and benefits to species responding to climate change. - *Methods in Ecology and Evolution* 2: 125-142.
- THUST, R., KUNA, G., ROMMEL, R.-P. (2006): Die Tagfalterfauna Thüringens. Zustand in den Jahren 1991-2002. *Naturschutzreport Heft 23*, Jena.
- TOLMAN, T. & LEWINGTON, R. (1998): Die Tagfalter Europas und Nordwestafrikas. - Kosmos, Stuttgart, 319 S.
- WACHLIN, V., DEUTSCHMANN, U., KALLIES, A. TABBERT, H. (1993): Rote Liste der gefährdeten Tagfalter Mecklenburg-Vorpommerns. Schwerin.
- WEIDEMANN, J.-H. (1986): Tagfalter. Band 1. Entwicklung -Lebensweise. Melsungen (Neumann-Neudamm) 288 S.

Anschriften der Autoren:

Katharina J. Filz
 Universität Trier
 Biogeographie
 Universitätsring 15
 54296 Trier
 E-Mail: kfilz@yahoo.de

Prof. Dr. Thomas Schmitt
 Universität Trier
 Biogeographie
 Universitätsring 15
 54296 Trier
 E-Mail: thsh@uni-trier.de