

### 3.10 Einfluss des Klimawandels auf die Phänologie von Pflanzen und Tieren

FRANK-M. CHMIELEWSKI

**Einfluss des Klimawandels auf die Phänologie von Pflanzen und Tieren:** Die jährlich wiederkehrenden Entwicklungszyklen von Organismen, die in der Phänologie beobachtet werden, zeigen mit Ausnahmen in den Tropen weltweit eine starke Abhängigkeit von der Lufttemperatur. Gegenwärtig sind phänologische Untersuchungen auf das Verständnis der phänologischen Plastizität von Pflanzen und Tieren ausgerichtet, um die Auswirkungen des Klimawandels auf biologische Systeme besser verstehen zu können. Es ist von grundlegendem Interesse, die Interaktionen zwischen Organismen zu untersuchen, da sie unterschiedlich stark auf den Klimawandel reagieren können, so dass es zu Asynchronitäten zwischen Arten und Gemeinschaften kommen kann. In diesem Zusammenhang sind Pflanze-Tier Interaktionen von fundamentalem Interesse. Die Phänologie erstreckt sich mehr und mehr von Landoberflächen bis zu marinen Gebieten, von Pflanzen zu Tieren und geographisch von den Tropen bis in die borealen Zonen. Globale und regionale Netzwerke führen die Beobachtungen zusammen und ermöglichen ein besseres und tieferes Verständnis von Wechselwirkungen zwischen Pflanzen, Tieren und Regionen. Dieses Kapitel gibt einige anschauliche Beispiele wie Pflanzen und Tiere auf Veränderungen der Lufttemperatur reagiert haben.

**Impact of climate change on the phenology of plants and animals:** The annual timing of life cycle events, which are observed in phenology, shows with exceptions in the tropics strong relationships to changing air temperatures around the globe. Currently, phenological studies are focused on the evaluation of the plasticity of plants and animals in order to better understand the response of species and communities to climate change. It is important to investigate the interactions between organisms, because they can respond differently to climate change, and in future a mismatch between species can occur. In this context plant-animal interactions are of fundamental interest. Phenology is covering more and more areas from land phenology to marine phenology, from plants to animals and geographically from the tropics to the boreal zones. Global or regional phenological databases bring these observations together and allow a better and deeper understanding of interactions between species and regions. This chapter shows some graphic examples of how plants and animals reacted to changes in air temperature.

Phänologische Beobachtungen, die die jährlich wiederkehrenden Entwicklungsstadien der Flora und Fauna festhalten, sind zu wichtigen Indikatoren für den Nachweis von Klimaänderungen in der Biosphäre geworden. Mit Hilfe dieser Beobachtungen ist es möglich aufzuzeigen, welche Auswirkungen klimatische Veränderungen auf die Entwicklungszyklen von Tieren und Pflanzen haben. Gut belegt sind die Änderungen pflanzenphänologischer Stadien im Frühjahr, die stark temperaturabhängig sind und somit auch im Zusammenhang mit Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation stehen. Die Verfrühung der phänologischen Stadien in den mittleren und höheren Breiten im Frühjahr (Blüte, Blattentfaltung) der Nordhemisphäre beträgt für die vergangenen 3–5 Jahrzehnte artenspezifisch ca. 1–4 Tage pro Jahrzehnt. Hingegen tendieren die Herbstphasen zu einer Verspätung, die jedoch deutlich geringer und weniger einheitlich ist. Die vielfach zitierte Verlängerung der allgemeinen Vegetationsperiode ergibt sich somit hauptsächlich aus dem früheren Beginn dieses Zeitraumes. Mesoklimatische Besonderheiten, wie sie vor allem im Gebirge oder auch im urbanen Bereichen vorkommen, sind ebenfalls an phänologischen Daten nachweisbar. In Gebirgsregionen wird vor allem die Höhenabhängigkeit in den Eintrittsterminen phänologischer Phasen deutlich. Städte haben ihr eigenes anthropogenes Klima, hervorgerufen durch

Bebauung, Versiegelung des Bodens, Abwärme aus technischen Prozessen, etc. Die Überwärmung der Städte (urbaner Wärmeineffekt) widerspiegelt sich deutlich in der Pflanzenentwicklung, so dass – im Vergleich zum Umland – die Gehölze im städtischen Bereich einige Tage früher austreiben oder zu blühen beginnen (HUPFER & CHMIELEWSKI 1990, BERNHOFER 1991, RÖTZER et al. 2000, JOCHNER & MENZEL 2015).

Phänologische Daten sind darüber hinaus von großem Wert zur Eichung von Satellitendaten. Hieraus abgeleitete Indices wie der NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) können nur anhand von Bodenbeobachtungen kalibriert werden. Trends in der Phänologie und in den Fernerkundungsdaten ergänzen einander und zeigen eine Verlängerung der Vegetationsperiode in den mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre (REED et al. 1994, STÖCKLI & VIDALE 2004).

In der Fauna findet sich ebenfalls eine Vielzahl von Belegen, die auf ein zeitigeres Auftreten tierphänologischer Phasen hinweisen. Anschauliche Beispiele sind Veränderungen im Zugverhalten und in der Brutzeit bei Vögeln. Aktuell sind daher viele Untersuchungen auf die Synchronität zwischen pflanzen- und tierphänologischen Phasen ausgerichtet, um eventuelle Asynchronitäten durch Umweltveränderungen aufzeigen zu können. Synchronisierte phänologische Phasen, die eine differenzierte Sensitivität gegenüber Umweltein-

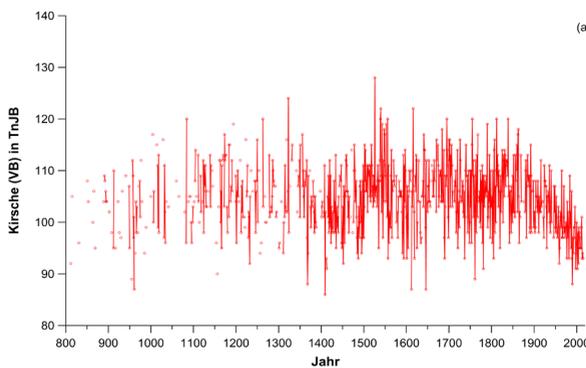
flüssen, beispielsweise der Lufttemperatur und Tageslänge haben, können im Zuge klimatischer Veränderungen auseinander laufen (PARMESAN 2007, BOTH et al. 2009). In der englischsprachigen Literatur spricht man in diesem Zusammenhang von »mismatch«, der sich beispielsweise zwischen herbivoren Insekten und ihrem Wirt, zwischen Pflanzen und ihren Bestäubern (HEGLAND et al. 2009) bzw. der Ankunft von Zugvögeln und dem Nahrungsangebot (VISSER & BOTH 2005) ergeben kann. Nachfolgend werden exemplarisch einige Beispiele gezeigt, die den Einfluss des Klimawandels auf phänologische Stadien belegen.

### Auswirkungen von Klimaschwankungen auf die Pflanzenphänologie

Die Phänologie ist wahrscheinlich der einfachste und am besten untersuchte Bereich, um Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre aufzuspüren und einem breiten Publikum zu vermitteln. Phänologische Daten haben daher in den letzten Jahrzehnten zunehmende Akzeptanz für vielfältige Fragestellungen in der Klima- und vor allem in der Klimawirkungsforschung gefunden.

Die Beobachtung der Kirschblüte in Japan, festgehalten in den Archiven des kaiserlichen Hofes, hat einen traditionellen Hintergrund und ist die älteste phänologische Zeitreihe (SEKIGUCHI 1969). Die Vollblüte der Japanischen Kirsche wird im langjährigen Mittel (801–2015) am 15. April ( $s = 6,5$  Tage) beobachtet (Abb. 3.10-1a).

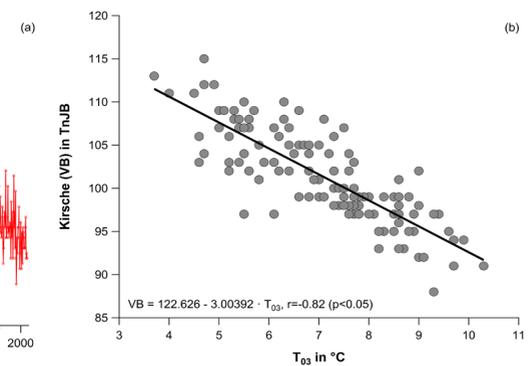
Neben längerperiodischen Schwankungen in der Reihe, ist eine stetige Verfrühung der Kirschblüte seit ca. 1900 von 0,85 Tagen/Jahrzehnt ( $p < 0,05$ ) zu erkennen. In den letzten 25 Jahren lag der mittlere Blühtermin so früh wie noch nie (6. April, 96 TnJB). Ursache für die zunehmend frühere Blüte ist die beobachtete Zunahme der Märzmitteltemperatur um 0,26 K/Jahrzehnt im Zeitraum 1901–2010, die sowohl auf urbane Effekte als auch auf den deutlichen Temperaturanstieg seit dem 20. Jahrhundert zurückzuführen ist (Abb. 3.10-1b).



Eine weitere bemerkenswerte phänologische Reihe stellt die ununterbrochene Beobachtung des Knospenaustriebs an einer Rosskastanie in Genf seit 1808 dar (u.a. DEFILA & CLOT 2003). Auch in dieser Reihe ist eine stetige Verfrühung des Blattaustriebs seit ca. 1900 zu erkennen. Beide hier genannten Beobachtungen waren nicht wissenschaftlich motiviert. Die Reihen der Kirschblüte und Rosskastanie erlangten jedoch im Nachhinein vor allem wegen ihrer Länge an Beachtung.

Neben diesen beiden Reihen gibt es eine Vielzahl von Belegen über rezente Veränderungen in der Pflanzenentwicklung. Dieses betrifft vor allem die Regionen in den gemäßigten und höheren Breiten der Nordhemisphäre, in denen ein ständiger Wechsel zwischen aktiver Wachstumszeit im Sommerhalbjahr und winterlicher Ruhe stattfindet. Hinweise hierzu fanden sich u.a. in China (CHEN & ZHANG 2001), Deutschland (MENZEL et al. 2001, CHMIELEWSKI et al. 2004), England (AMANO et al. 2010), Estland (JAAGUS & AHAS 2000), Irland (DONNELLY et al. 2006), Kanada (BEAUBIEN & FREELAND 2000), Spanien (PEÑUELAS et al. 2002), Ungarn (WALKOVSKY 1998), den USA (SCHWARTZ & REITER 2000, CAYAN et al. 2001) der Schweiz (DEFILA & CLOT 2001, RUTISHAUSER et al. 2009), der Slowakei (BRASLAVSKÁ & KAMMENSKY 1999) sowie in vergleichenden Studien für Mitteleuropa (MENZEL & FABIAN 1999, CHMIELEWSKI & RÖTZER 2001, KOCH & SCHEFINGER 2004, MENZEL et al. 2006). Mehrheitlich berichten die Autoren von Verfrühungen in der Blattentfaltung und Blüte von Pflanzen, die sich in den letzten 30 bis 50 Jahren auf 1,4–3,1 Tage pro Jahrzehnt in Europa und auf ca. 1,2–2,0 Tage pro Jahrzehnt in Nordamerika belaufen (PARMESAN & YOHE 2003, ROOT et al. 2003, ROSENZWEIG et al. 2008). Im Gegensatz zu denen im Frühjahr und teilweise im Sommer vorherrschenden negativen Trends, tendieren die Herbstphasen mit deutlich schwächeren Verspätungen.

Die Mehrzahl der Autoren beschreibt die deut-



**Abb. 3.10-1:** Vollblüte (VB) der Japanischen Kirsche (*Prunus Jamasakura*) 801–2015 in Kyoto, Japan (a) und Korrelation zwischen der mittleren Märztemperatur und der Kirschblüte im Zeitraum 1901–2010 (b), TnJB: Tage nach Jahresbeginn, Datenquelle: <http://www.envi.osakafu-u.ac.jp/atmenv/aono/KyoPhenoTemp4.html>.

lichen Veränderungen der Pflanzenentwicklung im phänologischen Frühjahr, die aus der relativ hohen Variabilität der Lufttemperatur in dieser Jahreszeit resultieren. Der phänologische Frühling startet mit einigen Phasen bereits im kalendrischen bzw. meteorologischen Winter. Außerdem liegen die Temperaturen im Frühjahr noch weit unterhalb der pflanzenspezifischen Optima, so dass überdurchschnittliche Temperaturen zwangsläufig zu einer beschleunigten Pflanzenentwicklung führen. Somit sind die Reaktionen der Pflanzen im Frühjahr außerordentlich stark an die Variabilität des Wetters geknüpft.

Abb. 3.10-2 zeigt eine deutliche Verfrüfung des Beginns der Forsythienblüte von fast vier Wochen (-4,0 Tage/Jahrzehnt) in dem dargestellten Zeitraum. Der Temperaturverlauf (Hamburg-Fuhlsbüttel) weist auf

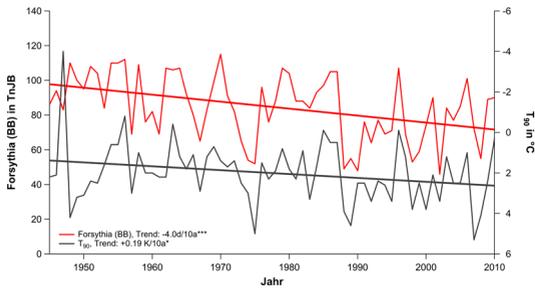
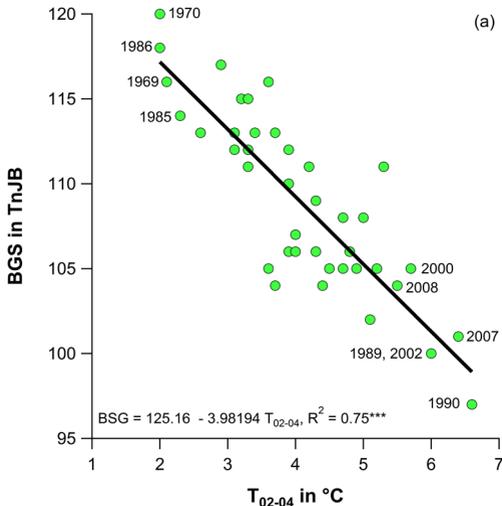


Abb. 3.10-2: Blühbeginn der Forsythie (BB) für den Standort »Hamburger Lombartsbrücke« (Forsythien-Kalender, 1945–2010 (notiert von Carl Wendorf (†1984) und Jens Iska-Holtz) und mittlere Lufttemperatur (T90) jeweils 90 Tage vor Blühbeginn sowie lineare Trends, TnJB: Tagen nach Jahresbeginn.



eine Verfrüfung des Blühbeginns um 22 Tage/K hin. Man beachte in diesem Zusammenhang jedoch auch, dass die höchste mittlere Lufttemperatur im Jahr 2007 nicht der frühesten Forsythienblüte entspricht. Dies könnte ein Hinweis auf andere Wirkungsmechanismen sein, die bei steigender Lufttemperatur nicht zu einer stetigen Verfrüfung des Blühtermins führen (Fu et al. 2015, JOCHNER et al. 2016). Der ausgesprochen warme Herbst und Winter 2006/2007 (Temperaturanomalien von September 2006 bis Januar 2007 zwischen 3,1 und 4,9 K) kann für einige Gehölze zu einem unzureichenden winterlichen Kältereiz geführt haben (CHMIELEWSKI et al. 2012), so dass es nicht zu einer adäquaten Verfrüfung des Blühbeginns kam.

Neben diesem winterlichen Kältebedürfnis, ist für den Blühbeginn bzw. die Blattentfaltung vieler Gehölze der Verlauf der Lufttemperatur zwischen Februar und April von entscheidender Bedeutung. Je höher die mittleren Temperaturen in diesen Zeitraum sind, desto früher wird heutzutage die Phase beobachtet. Dieser Zusammenhang lässt sich ebenfalls für den Beginn der Vegetationsperiode in Mitteleuropa (Mittlere Blattentfaltung verschiedener Gehölzarten) zeigen (Abb. 3.10-3).

Die Variationen der Lufttemperatur und des Vegetationsbeginns korrelieren außerordentlich gut miteinander. Jahre mit unterdurchschnittlichen Temperaturen zwischen Februar und April ( $T_{02-04} \leq 2,5 \text{ °C}$ ) wie 1969, 1970, 1985, 1986 waren durch einen verspäteten Beginn der Vegetationsperiode gekennzeichnet. Hingegen führten die markanten positiven Tempera-

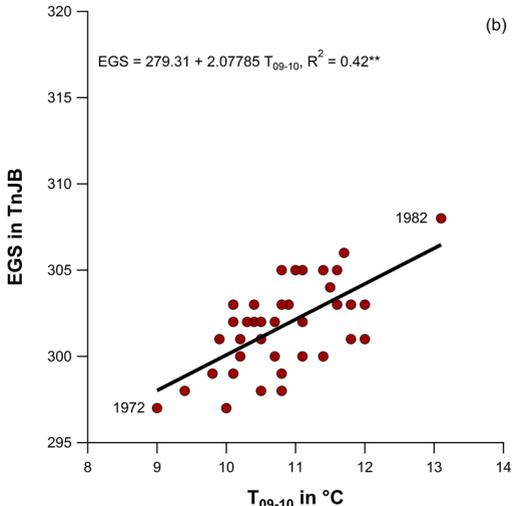


Abb. 3.10-3: Zusammenhang zwischen der mittleren Lufttemperatur von Februar-April ( $T_{02-04}$ ) sowie von September-Oktober ( $T_{09-10}$ ) und (a) dem Beginn der Blattentfaltung (BGS) sowie (b) dem Beginn des Blattfalls (EGS) in Europa 1969–2010, erweitert nach CHMIELEWSKI & RÖTZER (2001). Phänologische Daten: IPG Stationen (CHMIELEWSKI et al. 2013b), Temperaturdaten: E-OBS Daten, 0,25°- Auflösung (HAYLOCK et al. 2008) im Bereich der IPG-Stationen, TnJB: Tage nach Jahresbeginn.

turanomalien in den Jahren 1989, 1990, 2000, 2002, 2007, 2008 ( $T_{02-04} \geq 5,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) überwiegend zu außerordentlichen Verfrühungen im Vegetationsbeginn. Die Regressionsgleichung belegt, dass eine Zunahme der mittleren Februar-April Temperatur um 1 K zu einer Verfrühung des Vegetationsbeginns um 4 Tage führt.

Der Zusammenhang zwischen dem Beginn des Blattfalls in Europa und der mittleren Lufttemperatur im September-Oktober ( $T_{09-10}$ ) ist auch statistisch gesichert, jedoch nicht so stark wie die Beziehung im Frühjahr (Abb. 3.10-3b). Steigende Temperaturen zum Herbstanfang verzögern den Blattfall, im Mittel um ca. 2 Tage je K. Das Jahr mit dem frühesten Blattfall in Europa (1972) korrespondiert hier ebenfalls mit dem geringsten Temperaturmittel.

Es ist auch hier offensichtlich, dass sich dieser einfache Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und phänologischem Eintrittsdatum nicht linear fortschreiben lässt. Pflanzen und Tiere können nur in einer individuell vorgegebenen Spannweite mit Verfrühungen bzw. Verspätungen auf die Temperaturänderung reagieren (phänologische Plastizität, VITASSE et al. 2010). Der

hier approximativ dargestellte lineare Zusammenhang zwischen Temperatur und Phaseneintritt nähert sich sowohl im unteren als auch im oberen Temperaturbereich asymptotisch einem Grenzwert an (Sigmoidfunktion). Bei Temperaturänderungen, die diese Schwelle über- bzw. unterschreiten, ist die Pflanze nur noch mittels genetischer Anpassung fähig auf die Umweltveränderungen zu reagieren (DONNELLY et al. 2012). Obwohl für Tiere die Migration in für sie günstigere Regionen einfacher ist als für Pflanzen, können letztere in für sie geeigneten ökologischen Nischen überleben. Falls ihnen all dies nicht gelingt, sind sie möglicherweise vom Aussterben bedroht (Abb. 3.10-4).

### Auswirkungen von Klimaschwankungen auf die Tierphänologie

Im Bereich der Tierphänologie finden sich viele Arbeiten, die von einer früheren Ankunft der Zugvögel berichten (DONNELLY et al. 2009, ASKEYEV et al. 2010, LEHIKONEN & SPARKS 2010, SAINO et al. 2010). Ebenso ist für einige Vogelarten ein früherer Beginn der Eiablage (CRICK & SPARKS 1999, BOTH et al. 2006, CHMIELEWSKI et al. 2013a) und Brutzeit (SANZ 2003, BOTH & VISSER 2005) belegt.

Abb. 3.10-5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem abrupten Temperaturanstieg (-5b) und der zeitgleichen Verfrühung des Legebeginns bei der Kohlmeise (-5a) im Raum Schlüchtern. In dem hier dargestellten Zeitraum verfrühte sich dieser Termin um 4,1 Tage/K. Eine lineare Fortschreibung dieser Beziehung ist auch hier nicht uneingeschränkt möglich. Neben der Lufttemperatur ist gerade bei Vögeln eine deutliche photoperiodische Reaktion nachgewiesen (COPPACK & PULIDO 2004), die eine natürliche Grenze für die Verfrühung des Brutbeginns darstellt, um eine Synchronisation zur Vegetationsentwicklung und zum Nahrungsangebot sicherzustellen. Dieser Tageslängeneffekt ist unbedingt bei der Modellierung tierphänologischer Phasen zu berücksichtigen (CHMIELEWSKI et al. 2013a).

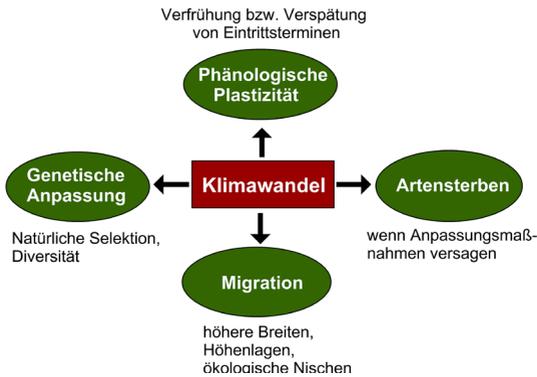


Abb. 3.10-4: Mögliche Strategien und Konsequenzen von Klimaänderungen für Pflanzen und Tiere.

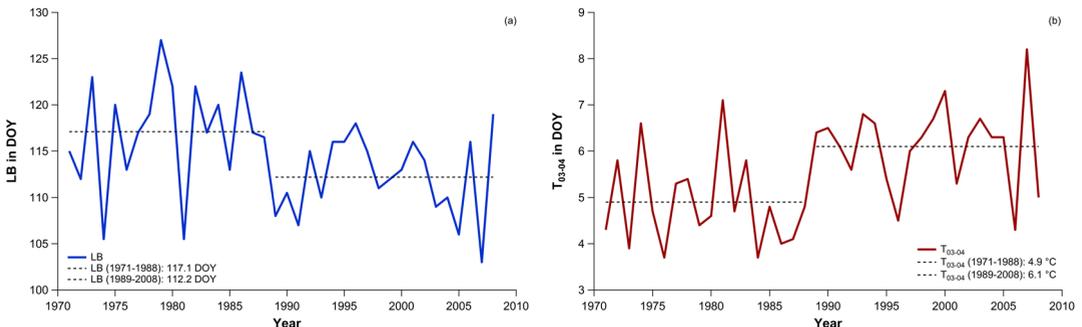


Abb. 3.10-5: Legebeginn (LB) der Kohlmeise im Raum Schlüchtern (Hessen) von 1971–2008 (a) und mittlere Lufttemperatur in der Region ( $T_{03-04}$ ) von März bis April (b), TnJB: Tagen nach Jahresbeginn.

**Fazit**

Die hier angeführten Beispiele zeigen, dass sich die jüngsten Klimaänderungen eindeutig im Jahresrhythmus der Pflanzen widerspiegeln. Die Phänologie macht anschaulich und leicht verständlich Wirkungen von Klimaänderungen für jeden erfahrbar. Klimatrends und Veränderungen in der Pflanzenphänologie scheinen bisher größtenteils konsistent zu sein. Somit existieren bis heute unterschiedliche Belege, die auf Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre hinweisen und die größtenteils dieselbe Sprache sprechen.

Zur Berechnung von phänologischen Eintrittsterminen für veränderte klimatische Verhältnisse sind die nichtlinearen Zusammenhänge zwischen den abiotischen Umweltfaktoren und den Entwicklungsstadien von Pflanzen und Tieren unbedingt zu berücksichtigen. In den letzten Jahren wird der Einfluss der Photoperiode auf die Entwicklung von Gehölzen weiter untersucht (CAFFARRA & DONNELLY 2011, CAFFARRA et al. 2011a, BASLER & KÖRNER 2012) und bei der phänologischen Modellierung berücksichtigt (CAFFARRA et al. 2011b, BLÜMEL & CHMIELEWSKI 2012, MATZNELLER et al. 2014). Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in einem schon seit Jahrzehnten diskutiertem, jedoch immer noch nicht vollständig verstandenem Prozess, der Dormanz von Gehölzen. Zunehmend finden sich auch hier Arbeiten, die sich vor dem Hintergrund des Klimawandels mit dieser Frage neu beschäftigen (u.a. BALDOCCI & WONG 2008, LUEDELING et al. 2009, CHMIELEWSKI et al. 2012). Zur Lösung dieses Problems sind neue Wege zu beschreiten, die einen tieferen Einblick in die pflanzenphysiologischen Prozesse während der Winterruhe der Gehölze erlauben (GÖTZ et al. 2014, CHMIELEWSKI & GÖTZ 2016) und somit eine unabdingbare Grundlage für die Verbesserung der phänologischen Modellierung sind. Die Zukunft der Phänologie wird damit nicht nur in der Beschreibung von Zusammenhängen zwischen Entwicklungsstadien und Umweltparametern liegen, sondern zunehmend auf ein physiologisch begründetes Verständnis der Entwicklungsprozesse der Pflanzen ausgerichtet sein. Einen sehr guten Überblick über den aktuellen Stand der phänologischen Forschung gibt der Abstractband der 3. Internationalen Phänologischen Konferenz im Jahr 2015 (PHENOLOGY 2015).

**Literatur:**

- AMANO, T., R. J. SMITHERS, T. H. SPARKS & W. J. SUTHERLAND (2010): A 250-year index of first flowering dates and its response to temperature changes. *Proc R Soc B* 277:2451-2457.
- ASKEYEV, O. V., T. H. SPARKS, I. V. ASKEYEV, D. V. TISHIN D. V. et al. (2010): East versus west: contrasts in phenological patterns. *Glob Ecol Biogeogr* 19:783-793.
- BALDOCCI, D. & S. WONG (2008): Accumulated winter chill is decreasing in fruit growing regions of California. *Clim Change* 87:153-166.
- BASLER, D. & C. KÖRNER (2012): Photoperiod sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology* 165:73-81.
- BEAUBIEN, E. G. & H. J. FREELAND (2000): Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *Int J Biometeorol* 44:53-59.
- BERNHOFER, C. (1991): Stadtphänologie am Beispiel der Forsythia. *Wetter und Leben* 43:213-218.
- BLÜMEL, K. & F.-M. CHMIELEWSKI (2012): Shortcomings of classical phenological forcing models and a way to overcome them. *Agric for Meteorol* 164:10-19.
- BOTH, C., S. BOUWHUIS, C. M. LESSELLS & M. E. VISSER (2006): Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. *Nature* 441:81-83.
- BOTH, C., M. VAN ACH, R. G. BIJLSMA, A. B. VAN DEN BURG et al. (2009): Climate change and unequal phenological changes for trophic levels: constrains or adaptation? *J Animal Ecology* 78:73-83.
- BOTH, C. & M. E. VISSER (2005): The effect of climate change on the correlation between avian life-history traits. *Global Change Biology* 11:1606-1613.
- BRASLAVSKÁ, O. & L. KAMMENSKY (1999): Leafing of forest trees and shrubs in the period 1986-1999, in Czech. *Atmosféra Storcía, Organizmy a Ekosystéma* 21:67-71.
- CAFFARRA, A. & A. DONNELLY (2011): The ecological significance of phenology in four different tree species: effects of light and temperature on bud burst. *Int J Biometeorol* 55:711-721.
- CAFFARRA, A., A. DONNELLY, I. CHUINE & M. B. JONES (2011a): Modelling the timing of *Betula pubescens* budburst. I. Temperature and photoperiod: a conceptual model. *Clim Res* 46:147-157.
- CAFFARRA, A., A. DONNELLY, I. CHUINE & M. B. JONES (2011b): Modelling the timing of *Betula pubescens* budburst. II. Integrating complex effects of photoperiod into process based models of budburst. *Clim Res* 46: 159-170.
- CAYAN, D. R., S. A. KAMMERDIENER, M. D. DETTINGER, J. M. CAPRIO et al. (2001): Changes in the onset of spring in the Western Unites States. *Bul Am Met Soc* 82:399-415.
- CHEN, X. Q. & F. ZHANG (2001): Spring phenological and non phenological fluctuations and its response to climate change in Beijing during the last 50 years. *Agric for Meteorol* 21:1-5.
- CHMIELEWSKI, F.-M., K. BLÜMEL & I. PÁLEŠOVÁ (2012): Climate change and shifts in dormancy release for deciduous fruit crops in Germany. *Clim Res* 54:209-219.
- CHMIELEWSKI, F.-M., K. BLÜMEL, C. SCHERBAUM-HEBERER et al. (2013a): A model approach to project the start of egg laying of great tit (*Parus major*) due to climate change. *Int J Biometeorol* 57:287-297.
- CHMIELEWSKI, F.-M., S. HEIDER, S. MORYSON & E. BRUNS (2013b): International Phenological Observation Networks - Concept of IPG and GPM. In: Schwartz M. D. (ed): *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Springer Science+Business Media B.V. Dordrecht, 2nd Edition, 137-153.
- CHMIELEWSKI, F.-M. & K. P. GÖTZ (2016): Performance of models for the beginning of sweet cherry blossom under current and changed climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 218-219:85-91.
- CHMIELEWSKI, F.-M., A. MÜLLER & E. BRUNS (2004): Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000, *Agricultural and Forest Meteorology* 121:69-78.
- CHMIELEWSKI, F.-M. & T. RÖTZER (2001): Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agric for Meteorol* 108:101-112.
- COPPACK, T. & F. PULIDO (2004): Photoperiodic response

- and the adaptability of avian life cycles to environmental change. *Advances in Ecological Research*, Birds and climate change. *Adv Ecol Res* 35:131-150.
- CRICK, H. Q. P. & T. H. SPARKS (1999): Climate change related to egg-laying trends. *Nature* 399:423-224.
- DEFILA, C. & B. CLOT (2001): Phytophenological trends in Switzerland. *Int J Biometeorol* 45:203-207.
- DEFILA, C. & B. CLOT (2003): Long-term urban-rural comparisons. In: Schwartz, M. D. (ed.): *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 541-554.
- DONNELLY, A., A. CAFFARRA, C. T. KELLEHER, B. F. O'NEILL et al. (2012): Surviving in a warmer world: environmental and genetic response. *Cim Res* 53:245-262.
- DONNELLY, A., T. COONEY, E. JENNINGS, E. BUSCARDO et al. (2009): Response of birds to climatic variability, evidence from the western fringe of Europe. *Int J Biometeorol* 53:211-220.
- DONNELLY, A., N. SALAMIN & M. B. JONES (2006): Changes in tree phenology: an indicator of spring warming in Ireland? *Biol Environ* 106:47-55.
- FU, Y. H., H. ZHAO, S. PIAO, M. PEAUCELLE et al. (2015): Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature* 526:104-107.
- GÖTZ, K. P., F.-M. CHMIELEWSKI, T. HOMANN, G. HUSCHEK et al. (2014): Seasonal changes of physiological parameters in sweet cherry (*Prunus avium* L.) buds. *Scientia Horticulturae* 172:183-190.
- HAYLOCK, M. R., N. HOFSTRA, A. M. G. KLEIN TANK, E. J. KLOK et al. (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113:D20119.
- HEGLAND, S. J., A. NIELSEN, A. LÁZARO, A. J. BJERKNES et al. (2009): How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology Letters* 12:184-195.
- HUPFER, P. & F.-M. CHMIELEWSKI (1990): *Das Klima von Berlin*. Akademie-Verlag Berlin, 288 S.
- JAAGUS, J. & R. AHAS (2000): Space-time variations of climatic seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia. *Clim Res* 15:207-219.
- JOCHNER, S. & A. MENZEL (2015): Urban phenological studies - Past, present, future. *Environmental Pollution* 203:250-261.
- JOCHNER, S., T. H. SPARKS, J. LAUBE & A. MENZEL (2016): Can we detect a nonlinear response to temperature in European plant phenology? *Int J Biometeorol*, doi:10.1007/s00484-016-1146-7.
- KOCH, E. & H. SCHEIFINGER (2004): Phenology as biological indicator for a warming Europe. *World Resource review* 16:173-182.
- LEHIKONEN, E. & T. H. SPARKS (2010): Changes in migration. In: Møller A. P., Fiedler W. & P. Berthold (eds): *Effect of climate change on birds*. Oxford University Press, London, 89-112.
- LUEDELING, E., BLANKE M. & J. GEBAUER (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf die Verfügbarkeit von Kältewirkungen (Chilling) für Obstgehölze in Deutschland. *Erwerbs-Obstbau* 51:81-94.
- MATZNELLER, P., BLÜMEL K. & F.-M. CHMIELEWSKI (2014): Models for the beginning of sour cherry blossom. *Int J Biometeorol* 58(5):703-715.
- MENZEL, A., ESTRELLA N. & P. FABIAN (2001): Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology* 7:657-666.
- MENZEL, A. & P. FABIAN (1999): Growing season extended in Europe. *Nature* 397:659.
- MENZEL, A., T. H. SPARKS, N. ESTRELLA, E. KOCH et al. (2006): European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12:1969-1976.
- PARMESAN, C. (2007): Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Glob Change Biol* 13:1860-1872.
- PARMESAN, C. & G. YOHE (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421:37-42.
- PEÑUELAS, J., I. FILELLA & P. COMAS (2002): Changes plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 8:531-544.
- PHENOLOGY (2015): Third International Conference on Phenology 5-8 October 2015, Kusadasi (Turkey). *Annalen der Meteorologie* 48, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 111 S.
- REED, B. C., J. F. BROWN, D. VANDERZEE, T. R. LOVELAND et al. (1994): Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science* 5:703-714.
- ROOT, T. L., J. T. PRICE, K. R. HALL, S. H. SCHNEIDER et al. (2003): Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421:57-60.
- ROSENZWEIG, C., D. KAROLY, M. VICARELLI, P. NEOFOTIS et al. (2008): Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature* 453:353-357.
- RÖTZER, T., M. WITTENZELLER, H. HÄCKEL & J. NEKOVAR (2000): Phenology in central Europe; differences and trends of spring-phenophases in urban and rural areas. *Int. J. Biometeorol.* 44:60-67.
- RUTISHAUSER, T., C. SCHLEIP, T. H. SPARKS, Ø. NORDDLI et al. (2009): Temperature sensitivity of Swiss and British plant phenology from 1753-1958. *Clim Res* 39:179-190.
- SAINO, N., R. AMBROSINI, D. RUBOLINI, J. VAN HARDENBERG et al. (2010): Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds. *Proc R Soc London, B, Biol Sci* 10:1-8.
- SANZ, J. J. (2003): Large-scale effect of climate change on breeding parameters of pied flycatchers in Western Europe. *Ecography* 26:45-50.
- SCHWARTZ, M. D. & B. E. REITER (2000): Changes in North American spring. *Int. J. Climatology* 20:929-932.
- SEKIGUCHI, T. (1969): The historical dates of Japanese cherry festival since the 8th century and her climatic changes in Tokyo. *Geog Papers* 13:175-190.
- STÖCKLI, R. & P. L. VIDALE (2004): European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameters data set. *Int. J. of Rem. Sensing* 25, 17:3303-333.
- VISSER, M. E. & C. BOTH (2005): Shifts in phenology due to global climate change. The need for a yardstick. *Prov R Soc B.* 272:2561-2569.
- VITASSE, Y., C. C. BRESSON, A. KREMER, R. MICHALET & S. DELZON (2010): Quantifying phenological plasticity to temperature in two temperate tree species. *Funct Ecol* 24:1211-1218.
- WALKOVSKY, A. (1998): Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary. *Int J Biometeorol* 41:155-160.

#### Kontakt:

Prof. Dr. Frank-M. Chmielewski  
 Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften  
 Humboldt-Universität zu Berlin  
 chmielew@agr.ar.hu-berlin.de

Chmielewski, F.-M. (2016): Einfluss des Klimawandels auf die Phänologie von Pflanzen und Tieren. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Rachor (Hrsg.), *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. pp. 158-163. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi: 10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.26.