

2.2 Das Klima in der Region Berlin-Brandenburg – Rückblick, Trends und Auswirkungen auf die Gehölzvegetation

Daniel Fenner & Sten Gillner

2.2.1 Einführung

Die großräumige regionale Topografie und die geografische Lage des Berlin-Brandenburger Gebiets prägen maßgeblich das Wetter und Klima für diesen Untersuchungsraum. Der vorliegende Beitrag stellt die für Pflanzen und Gehölzbestände relevanten klimatischen Größen in den Vordergrund und soll zeigen, dass bereits bis heute eine Änderung der klimatischen Gegebenheiten aufgetreten ist und dass diese Entwicklung, die verfügbaren Klimaprojektionen im Blick, weiter voranschreiten wird. Es soll insbesondere auf die spezifischen Auswirkungen eines sich wandelnden Klimas auf Gehölze eingegangen werden. Dazu werden im Folgenden zunächst Auswertungen der langjährigen Klimadaten der Messstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Potsdam auf dem Telegrafenberg angeführt (DWD, 2017; KASPAR et al., 2013). Diese Station ist hierfür gut geeignet, da sie bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts kontinuierlich betrieben wird und somit weit zurückreichende Zeitreihen der atmosphärischen Größen vorliegen. Im Weiteren werden relevante Ergebnisse bezüglich der möglichen (projizierten) Veränderung der klimatischen Bedingungen im Raum Berlin-Brandenburg durch den globalen Klimawandel zusammengefasst. Diese basieren größtenteils auf Daten regionaler Klimamodelle, welche mittels globaler Klimamodelle angetrieben wurden. Diese globalen Klimamodelle simulieren die weltweiten atmosphärischen Bedingungen unter definierten Szenarien einer möglichen Entwicklung der Konzentration klimarelevanter Treibhausgase, wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder Methan. Im letzten Abschnitt dieses Beitrags sollen dann die spezifischen Auswirkungen eines sich wandelnden Klimas auf Gehölze dargelegt werden. Für das Pflanzenwachstum sind als Klimaelemente die Lufttemperatur und der Niederschlag von zentraler Bedeutung (BARTSCH & RÖHRIG, 2016a). Dabei spielen nicht nur die jährlichen und jahreszeitlichen Mittelwerte der genannten Größen eine Rolle, sondern zudem klimatologische Kenntage und Ereignisse wie Trockenperioden, Spätfrost oder Hitzewellen. Eine Veränderung der klimatischen Bedingungen in diesen Extremen ist dabei für Pflanzen oft von größerer Bedeutung als eine Änderung in den jährlichen oder jahreszeitlichen Mittelwerten (REYER et al., 2013).

2.2.2 Derzeitige und vergangene Klimabedingungen im Raum Berlin-Brandenburg

Das langjährige Mittel der bodennahen Lufttemperatur beträgt derzeit in Potsdam 9,3 °C (1981–2010), was bereits 0,8 K (entspricht 0,8 °C) über dem Wert für die ersten drei Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts liegt (Tabelle 1). Seit Beginn des vorangegangenen Jahrhunderts hat sich die Lufttemperatur im Raum Berlin-Brandenburg also erhöht, und es kann ein statistisch signifikanter Trend von 0,1 K/Dekade (1901–2010, $p < 0,001$) in der Jahresmitteltemperatur nachgewiesen werden (Tabelle 1, Abbildung 1).

Tabelle 1: Jährliche und saisonale Mittelwerte und Trends ausgewählter klimatologischer Größen an der Messstation Potsdam (52,3813° N; 13,0622° O; 81 m ü.NN) für verschiedene Zeiträume. T_{mean} : Tagesmittelwert der Lufttemperatur in 2 m Höhe; T_{min} : Tagesminimum der Lufttemperatur in 2 m Höhe; T_{max} : Tagesmaximum der Lufttemperatur in 2 m Höhe. Frühling: März, April, Mai; Sommer: Juni, Juli, August; Herbst: September, Oktober, November; Winter: Dezember, Januar Februar. Statistisch signifikante Trends innerhalb der jeweiligen Zeiträume sind in eckigen Klammern als Wert pro Dekade (zehn Jahre) angegeben: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Datenquelle: DWD (2017); eigene Auswertungen.

| Größe | Zeitraum | Jahr | Frühling | Sommer | Herbst | Winter |
|------------------------|-------------------------------------|--------------|----------|----------------|----------|--------|
| T_{mean} (°C) | 1901–1930 | 8,5 | 8,2 | 16,8 | 8,4 | 0,4 |
| | 1981–2010 | 9,3 [+0,34*] | 9,2 | 18,0 [+0,55*] | 9,3 | 0,8 |
| | Trend 1901–2010 (K/Dekade) | +0,10*** | +0,11** | +0,13*** | +0,11** | - |
| T_{min} (°C) | 1901–1930 | 4,6 | 3,7 | 12,0 | 5,0 | -2,2 |
| | 1981–2010 | 5,4 | 4,5 | 13,0 [+0,46**] | 5,9 | -1,9 |
| | Trend 1901–2010 (K/Dekade) | +0,10*** | +0,10** | +0,11*** | +0,11*** | - |
| T_{max} (°C) | 1901–1930 | 13,0 | 13,6 | 22,5 | 12,7 | 3,0 |
| | 1981–2010 | 13,8 | 14,5 | 23,7 | 13,4 | 3,5 |
| | Trend 1901–2010 (K/Dekade) | +0,09*** | +0,10* | +0,13** | +0,08* | - |
| Niederschlag (mm/a) | 1901–1930 | 590,5 | 126,2 | 201,6 | 133,8 | 130,8 |
| | 1981–2010 | 585,5 | 133,1 | 185,0 | 130,1 | 136,8 |
| | Trend 1901–2010 (mm/a*Dekade) | - | - | - | - | - |

Dies gilt ebenso für das jährliche Mittel der Tagesminimum- (0,1 K/Dekade) und Maximumtemperatur (0,09 K/Dekade). Dabei zeigt sich, dass die Änderung insbesondere in den Jahreszeiten Frühling, Sommer und Herbst aufgetreten ist, wohingegen die Wintermonate trotz eines Anstiegs der Lufttemperatur keinen signifikanten Trend diesbezüglich zeigen (Tabelle 1).

Die thermisch definierte Wachstumsperiode (FRICH et al., 2002) von Pflanzen beträgt derzeit im Untersuchungsraum knapp 260 Tage im Jahr, also rund 8,5 Monate. Dabei hat sich die Dauer im Vergleich zum Anfang des 20. Jahrhunderts bereits um knapp einen Monat verlängert; eine signifikante Zunahme in der Dauer der Wachstumsperiode von 3,3 Tagen/Dekade ($p < 0,001$) kann nachgewiesen werden. Diese Zunahme ist insbesondere auf einen früheren Beginn und weniger auf ein späteres Ende der Wachstumsperiode zurückzuführen (Tabelle 2).

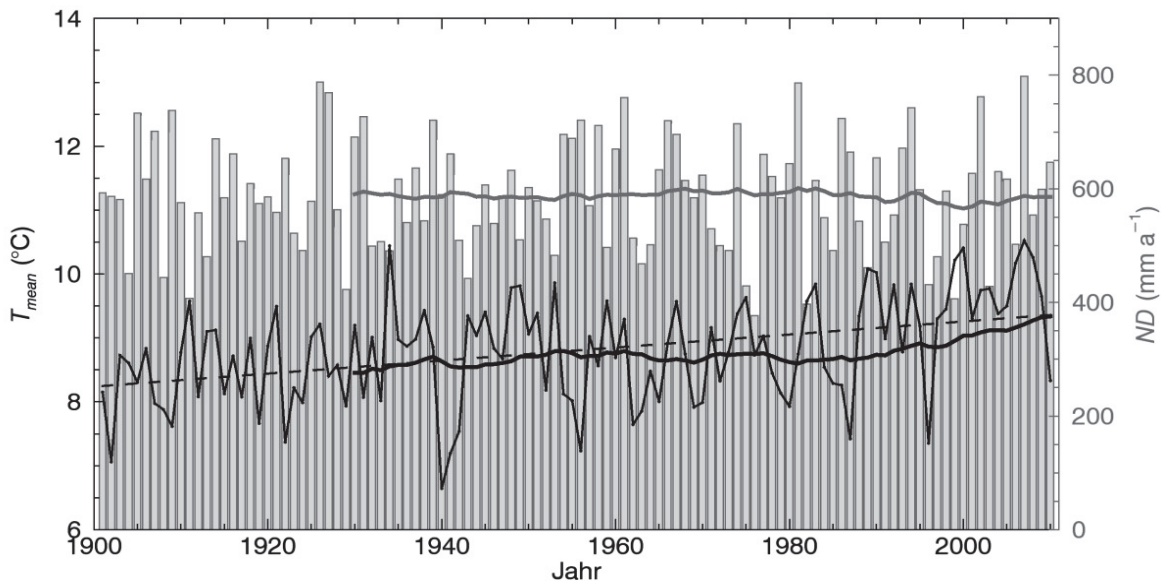


Abbildung 1: Mittlere jährliche Lufttemperatur in 2 m Höhe (T_{mean} , schwarz Linien) und jährliche Niederschlagssumme (ND, graue Balken) an der Messstation Potsdam ($52,3813^{\circ}$ N; $13,0622^{\circ}$ O; 81 m ü.NN) von 1901–2010. Die gestrichelte Linie zeigt den linearen Trend von T_{mean} ($0,1$ K/Dekade, $p < 0,001$), die dicken Linien den jeweiligen 30-jährigen gleitenden Mittelwert von T_{mean} und ND. Datenquelle: DWD (2017).

In Bezug auf lufttemperaturbasierte Kenntage sind zum einen Kenntage relevant, die Frostereignisse nach Beginn der Wachstumsperiode abbilden. Zum anderen spielen jedoch auch Hitzeepisoden mit hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum eine wichtige Rolle. Derzeit werden durchschnittlich zehn Spätfrosttage (SF-1) pro Jahr, also Tage mit Frost nach Beginn der Wachstumsperiode, registriert. Dies sind drei Tage mehr als noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts, was insbesondere den früheren Beginn der Wachstumsperiode als Ursache hat. Auch die Anzahl an Tagen mit starkem Spätfrost (SF-5) hat sich in den vergangenen Jahrzehnten erhöht (Tabelle 2). Für diesen Kenntag kann zudem ein statistisch signifikanter positiver Trend von $0,2$ Tagen/Dekade seit 1901 nachgewiesen werden. Es zeigt sich deutlich, dass die veränderten Klimabedingungen zwar einerseits dazu führen, dass die Pflanzen früher im Jahr mit dem Wachstum beginnen, dadurch jedoch anfälliger für Spätfrost werden. Bezüglich Hitzewellen zeigt sich ein signifikanter Anstieg an Hitzewellentagen pro Jahr von 1901 bis 2010 (Tabelle 2). Dieser Anstieg begründet sich auf eine durchschnittliche Zunahme der Ereignisse pro Jahr als auch auf eine durchschnittlich längere Dauer der einzelnen Hitzewellen (für diese beiden Kenntage ist jedoch kein signifikanter Trend nachweisbar).

Im langjährigen Mittel fallen in Potsdam knapp 600 mm Niederschlag pro Jahr (entspricht 600 l/m²), wobei das Maximum des Niederschlags in den Sommermonaten (ca. 200 mm) liegt, während in den anderen Jahreszeiten in etwa jeweils die gleiche Menge an Niederschlag fällt (ca. 130 mm, Tabelle 1). Für die mittleren Niederschlagsmengen lassen sich für die Messstation Potsdam seit Anfang des 20. Jahrhunderts keine signifikanten Trends nachweisen. Der jährliche und jahreszeitliche Niederschlag zeigt zudem eine hohe interannuelle Variabilität (Abbildung 1).

Tabelle 2: Ausgewählte klimatologische Kenntage und Trends für verschiedene Zeiträume an der Messstation Potsdam (52,3813° N; 13,0622° O; 81 m ü.NN). ND10/ND20: Niederschlagsereignisse mit mehr als 10 bzw. 20 mm/Tag (d); TT: Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage mit Niederschlag < 1 mm/d pro Jahr; WPLänge: Wachstumsperiode, nach Frich et al. (2002); WPBeginn: Beginn der Wachstumsperiode; WPEnde: Ende der Wachstumsperiode; SF-1: Spätfrosttage (Tagesminimum der Lufttemperatur < -1 °C) nach Beginn der Wachstumsperiode; SF-5: Starke Spätfrosttage (Tagesminimum der Lufttemperatur < -5 °C) nach Beginn der Wachstumsperiode; HW: Hitzewellen, nach HUTN et al. (2000); HWTage: Hitzewellentage; HWDauer: Hitzewellendauer. Für ND10, ND20 und TT wurden zudem die Werte innerhalb der Wachstumsperiode ermittelt (zweite Zahl im jeweiligen Feld). Alle Ergebnisse wurden auf ganze Tage gerundet. Statistisch signifikante Trends sind in eckigen Klammern als Wert pro Dekade (zehn Jahre) angegeben: *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001. DOY: Day of year/Tag des Jahres. Datenquelle: DWD (2017); eigene Auswertungen.

| Index | Zeitraum | | |
|----------------------|--------------|-----------|---------------------------------|
| | 1901–1930 | 1981–2010 | Trend 1901–2010 (pro Dekade) |
| ND10 (d/a) | 13/10 | 12/9 | -/- |
| ND20 (d/a) | 2/2 | 2/2 | -/- |
| TT (d) | 22/19 | 22/21 | -/- |
| WPLänge (d) | 235 [+11,3*] | 258 | +3,3*** |
| WPBeginn (DOY) | 77 | 60 | -2,6** |
| WPEnde (DOY) | 312 | 316 | - |
| SF-1 (d/a) | 7 | 10 | - |
| SF-5 (d/a) | 1 | 2 | +0,2* |
| HW (Ereignisse/a) | 0,8 | 1,2 | - |
| HWTage (d/a) | 6 | 11 | +0,7** |
| HWDauer (d/Ereignis) | 5 | 6 | - |

Auch bezüglich niederschlagsbasierter klimatologischer Kenntage zeigt sich bis heute kein statistisch signifikanter Trend in den Messdaten in Potsdam. Starke, bzw. extreme Niederschläge mit mehr als 10 mm, bzw. mehr als 20 mm Niederschlag am Tag kommen durchschnittlich an rund zwölf Tagen bzw. an rund zwei Tagen in Potsdam vor. Diese Anzahl hat sich seit Anfang des 20. Jahrhunderts nicht verändert und auch innerhalb der Wachstumsperiode ist die Anzahl auf einem ähnlichen Niveau (Tabelle 2). Dies verdeutlicht, dass Starkniederschläge insbesondere in den wärmeren Monaten auftreten und somit für das Pflanzenwachstum und für Gehölzbestände von Bedeutung sind. Die durchschnittliche maximale Länge von Trockenperioden pro Jahr beträgt derzeit rund drei Wochen (22 Tage; Tabelle 2).

2.2.3 Projizierte Klimaänderung

Für die Region Berlin-Brandenburg setzt sich bei den projizierten Klimaänderungen, insbesondere bezüglich der bodennahen Lufttemperatur, der bereits heute nachweisbare Trend fort. So kann sowohl für die Jahresmitteltemperatur als auch für die Jahresdurch-

schnittswerte der Tagesminimum- und Tagesmaximumtemperatur mit einem weiteren Anstieg um rund 3 K bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gerechnet werden (im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000; JACOB et al., 2014; eigene Auswertungen). Eine Zunahme tritt insbesondere in den Herbst- und Wintermonaten auf, was mit einer Abnahme der winterlichen Frosttage einhergeht, ebenso wie mit einer deutlichen Verlängerung der Wachstumsperiode der Pflanzen um weitere 26 Tage (Medianwert eines Modellensembles von neun Simulationen für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zu 1971–2000; JACOB et al., 2014). Für die Sommermonate muss mit einem häufigeren Auftreten von Hitzewellen gerechnet werden (JACOB et al., 2014; Russo et al., 2014). Hitzewellen in Mitteleuropa werden zudem wahrscheinlich auch an Intensität gewinnen (BENISTON et al., 2007; FISCHER & SCHÄR, 2010; KOFFI & KOFFI, 2008) und größere geografische Räume betreffen (Russo et al., 2015). Hitzewellen könnten somit für Gehölzbestände in Zukunft an Relevanz gewinnen, insbesondere wenn diese Hitzeepisoden mit Trockenheit einhergehen. Eine robuste Aussage bezüglich der Änderung der Sommerniederschläge lässt sich anhand der derzeitigen Klimaprojektionen für das Untersuchungsgebiet jedoch nicht ableiten. Ebenso ist in den verfügbaren Klimaprojektionen keine oder nur eine geringfügige Veränderung in der Dauer von Trockenperioden für Berlin-Brandenburg nachweisbar (JACOB et al., 2014; Lindner et al., 2014; eigene Auswertungen). Dagegen ist mit einer Zunahme der jährlichen Niederschlagssumme um bis zu 20 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zu 1971–2000 zu rechnen, insbesondere im Winter und Frühjahr (JACOB et al., 2014; eigene Auswertungen). Dies könnte sich günstig auf den Bodenwassergehalt zu Beginn der Wachstumsperiode und somit auf das Pflanzenwachstum auswirken.

In Bezug auf Starkniederschläge zeigen die regionalen Klimamodelle eine statistisch signifikante Zunahme dieser Ereignisse in den kommenden Jahrzehnten, insbesondere für die Jahreszeiten Herbst, Winter und Frühling (JACOB et al., 2014; MARAUN, 2013). Eine mögliche Änderung von Starkniederschlägen im Sommer tritt wahrscheinlich erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts auf (MARAUN et al., 2013). Es muss jedoch angemerkt werden, dass Aussagen bezüglich der Änderung von Niederschlagsereignissen in den Klimaprojektionen zum Teil mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.

Weitere Auswertungen zu möglichen Klimaänderungen für den Berliner Raum sind im Berliner Konzept zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (AFOK) zusammengefasst (SENUVK, 2017). Darüber hinaus geben BRASSEUR et al. (2017) einen umfangreichen Überblick über das Thema für ganz Deutschland.

2.2.4 Spezifische Auswirkungen auf Gehölze

Der Klimawandel wirkt sich auf Gehölze in Abhängigkeit von den Standortbedingungen, den allgemeinen Klimabedingungen, der betreffenden Baumarten sowie der Provenienz der Baumart ganz unterschiedlich auf die Wachstums- und Lebensvorgänge aus. Die direkten Auswirkungen, wie beispielsweise ein vorzeitiger Blattfall durch Sommertrockenheit, werden dabei von vielen indirekten Auswirkungen überlagert (Tabelle 3) (BARTSCH & RÖHRIG, 2016b). Ein solch indirekter Effekt ist beispielsweise ein erhöhtes Waldbrandrisiko durch Sommertrockenheit. Frühjahrs- und Sommertrockenheit ist für Gehölze von elementarer Bedeutung, besonders in der Hauptwachstumszeit von April bis Juli, da sie hier für die Prozesse der Zellteilung und der Zellstreckung auf eine adäquate Wasserversorgung angewiesen sind (Tabelle 3). Dabei ist es entscheidend, wie Baumarten verfahren, um interne Wasserdefizite zu verhindern und Wasser aus dem Boden zu absorbieren.

Auf wöchentlicher Ebene führt Frühjahrs- und Sommertrockenheit durch die verminderte Netto-Photosynthese zu einer geringen CO₂-Aufnahme und folglich zu einer geringeren Assimilatproduktion (BARTSCH & RÖHRIG, 2016b). Bei weiter anhaltender und sich intensivierender Trockenheit wird dieser negative Effekt noch durch vorzeitigen Blattfall verstärkt (KORN, 2016). Mittelfristig stehen damit dem Baum zum Aufrechterhalten seiner Lebensvorgänge weniger Assimilate zu Verfügung und es kommt zum Absterben von Zweigen, Ästen und Wurzeln (KORN, 2016). Dieser Nettoverlust von Kohlenstoff führt über längere Zeit zu einer verminderten Vitalität und erhöhten Prädisposition für Pathogene (CHMURA et al., 2011). Intensivere und häufiger vorkommende Trockenperioden und Hitzewellen werden in weiten Teilen Europas auch als Hauptursache für eine ansteigende Mortalität von Gehölzen betrachtet. Beispielsweise lässt sich für die außergewöhnlich heiße und trockene Witterung im Jahr 2003 für weite Teile West- und Zentraleuropas eine hohe Mortalität von Eichen, Fichten, Tannen, Buchen und Kiefernarten nachweisen (LANDMANN & DREYER, 2006). Gegenwärtig wird kontrovers diskutiert, ob dabei der Mangel an CO₂-Aufnahme oder hydraulisches Versagen letztendlich für eine trockenheitsinduzierte Mortalität von Gehölzen ausschlaggebend ist (MCDOWELL et al., 2008).

Unter zukünftiger Trockenzeiten entscheidend ist auch, wie sich die Wassernutzungseffizienz, die das Verhältnis von Wasserdampfabgabe und Kohlendioxidaufnahme durch die Stomata beschreibt, unter einer weiteren Zunahme des atmosphärischen CO₂-Gehaltes verändert (CHMURA et al., 2011). Unter der Annahme einer verbesserten Wassernutzungseffizienz könnten die negativen Effekte einer limitierten Wasserversorgung zumindest partiell wieder ausgeglichen werden (BATTIPAGLIA et al., 2013; DE KAUWE et al., 2013). Auch ist für trockene Standorte eine höhere Trockentoleranz der Baumarten zu erwarten, da diese häufig eine größere Xylemleitfähigkeit und Resistenz gegen Embolien aufweisen (MAHERALI et al., 2004). Eine Voraussetzung scheint dabei die Dauer und Intensität der Trockenheit zu sein. Bei einer sich langsam entwickelnden und intensivierenden Trockenperiode scheinen sich Gehölze mithilfe der Osmoregulation besser anzupassen als bei einer schnell einsetzenden Trockenperiode (CHMURA et al., 2011).

Hohe Temperaturen im Frühjahr, die einen frühen Austrieb induzieren, erhöhen gleichzeitig das Risiko von Spätfrostschäden (AUGSPURGER, 2013; CHMURA et al., 2011; KREYLING et al., 2012). Besonders in Kombination mit Trockenheit hemmt eine hohe Frühjahrestemperatur die Keimung und vermindert zudem die Etablierung von Sämlingen. Milde Winter könnten sich negativ auf die Winterhärte von Bäumen auswirken und die Anfälligkeit für Frostschäden erhöhen (CHMURA et al., 2011; HÄNNINEN, 2006). Dies ist insofern bedeutend, da der Rückgang der Frosttage gleichzeitig von einem Anstieg außergewöhnlich starker Frostereignisse begleitet werden könnte (LINDNER et al., 2014). Es gibt für viele Arten ferner Hinweise, die auf einen verzögerten Austrieb nach milden Wintern hindeuten, da die für den Austrieb notwendige Dauer und Anzahl von Mindesttemperaturen nicht erreicht wurde (CHMURA et al., 2011; COOK et al., 2012).

Die Auswirkungen des Klimawandels müssen jedoch nicht zwangsläufig negative Folgen aufweisen. Besonders temperatursensitive Arten könnten von der früher einsetzenden, und später endenden Vegetationsperiode profitieren und so eine verstärkte Robustheit und Vitalität zeigen (WILLIAMS et al., 2015).

Tabelle 3: Klimatische Effekte und Auswirkungen auf Gehölze nach AHRENDS et al. (2009), BOLTE et al. (2009), CHMURA et al. (2011), CHOAT et al. (2012), LINDNER et al. (2014), WILLIAMS et al. (2015).

| Klima-elemente | Teileffekte | Auswirkung auf Gehölzbestände |
|-----------------|---|---|
| Luft-temperatur | Höhere Mitteltemperatur | <ul style="list-style-type: none"> - Anstieg der Umsetzungs- und Mobilisierungsraten, schnellere Zersetzung der Streu, Änderung der Nährstoffverfügbarkeit - Anstieg der Netto-Primärproduktion (bei ausreichender Wasserversorgung) - mittel- und langfristig: verändertes interspezifisches Konkurrenzgefüge - Veränderung des Spektrums der Pathogene und der Frequenz von Insektenkalamitäten (bspw. sind Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit zur Zeit der Sporenreife für die Verbreitung entscheidend), besonders starke Zunahme der nadel- und blattfressenden Insekten - zunehmende Einwanderung und Verbreitung wärmeadaptierter Arten, Rückgang von Arten aus kühlen Habitaten |
| | Höhere Temperaturen im Frühjahr | <ul style="list-style-type: none"> - früherer Austrieb, Risiko von Schäden durch Spätfrost steigt - je nach Witterungsbedingungen der vorhergehenden Wintermonate aber auch verspäteter Austrieb einiger Pflanzen - Steigerung der Robustheit bei temperatursensitiven Arten, durch eine Verlängerung der Vegetationsperiode und verstärkte Ressourcenakkumulation |
| | Höhere Wintertemperaturen | <ul style="list-style-type: none"> - Auswirkungen auf den Blattaustrieb im Frühjahr, teilweise verzögerter Austrieb - Begünstigung von Pathogenen, z.B. Phytophthora-Arten - Erhöhung der Vulnerabilität für Frost |
| | Höhere Evaporation | <ul style="list-style-type: none"> - vermehrte Bodentrockenheit - Anstieg der Taubildung, verstärkte Prädisposition für Blattpilze, z.B. Falscher Mehltau |
| | Häufigere und länger anhaltende Hitzeepisoden im Sommer | <ul style="list-style-type: none"> - Schäden der Blätter durch Ozon besonders bei ausreichender Wasserversorgung (Stomata der Blätter sind geöffnet, Ozon dringt in die Blätter ein) - vorzeitiger Blattfall im Sommer (geringere Netto-Primärproduktion) - verstärkte Prädisposition für wärmeliebende Pathogene und Insekten - Änderung der Nährstoffverfügbarkeit - verminderte Regenerationsfähigkeit auf Stress |

Tabelle 3 - Fortsetzung: Klimatische Effekte und Auswirkungen auf Gehölze nach AHRENDS et al. (2009), BOLTE et al. (2009), CHMURA et al. (2011), CHOAT et al. (2012), LINDNER et al. (2014), WILLIAMS et al. (2015).

| Klima-elemente | Teileffekte | Auswirkung auf Gehölzbestände |
|----------------|-------------------------------------|--|
| Niederschlag | Anstieg des Niederschlags im Winter | - winterwarme und winterfeuchte Witterung wirken sich ungünstig auf das Puppenstadium einiger Insekten aus, z.B. Kieferneule, Kiefernspanner |
| | Frühjahrstrockenheit | - akuter Wassermangel schädigt die Keimung und Verjüngung (erhöhte Mortalität von Keimlingen, Sämlingen) - ungünstige Startbedingungen für den Blattaustrieb, besonders bei ringporigen Baumarten - Bodenwasser- und Bodenbedingungen (Niederschläge im Winter) werden für die Wasserversorgung der Bäume wichtiger |
| | Sommertrockenheit | - Stomatenschluss, geringe Netto-Photosynthese, vorzeitiger Blattfall, vermehrte Zweigabsprünge, Absterben von Ästen in der Krone, Rückgang der Netto-Primärproduktion - Gefahr von trockenheitsinduzierten Embolien steigt, damit verringert sich die leitende Querschnittsfläche von Bäumen, Wassertransport wird erschwert - erhöhte Prädisposition von Gehölzen für Insektenbefall und bestimmte Pathogene, teilweise geringere Prädisposition für Pilze, die eine höhere Luftfeuchtigkeit benötigen - Anstieg des Waldbrandrisikos, vor allem in Beständen mit einer Dominanz von Nadelgehölzen - Benetzbarkeit des Bodens sinkt, bei Starkregen erhöhte Stoffauswaschungen und verminderte Infiltration (Eindringen des Wassers in den Boden) - verändertes Spross-Wurzel-Verhältnis, bei relativ mildem Trockenstress wird das Wurzelwachstum weniger stark eingeschränkt als das Sprosswachstum (Wachstum zugunsten der Wurzel) - geringe Nadel-/Blattanzahl im Folgejahr - verminderte Regenerationsfähigkeit auf Stress |
| | Starkniederschläge | - Anstieg des Grundwasserspiegels, Wurzelschäden durch Sauerstoffmangel, Anstieg der Instabilität und Wurffgefährdung - Überschüttung im Wurzelbereich, Wurzelschäden, Anstieg der Mortalität |

Bei einer ausreichenden Wasserversorgung können Bäume von einer verlängerten Vegetationsperiode und höheren Netto-Primärproduktion sowie einer längeren Zeit für die Bildung von Assimilaten durch einen später einsetzenden Laubfall profitieren (KÖRNER & BASLER, 2010). Vor diesem Hintergrund haben der Klimawandel und die Erhöhung der Durchschnittstemperaturen auch Auswirkungen auf die Migration von Arten. Beispielsweise hat der Anstieg der Winterminimumtemperaturen zu einer Verbreitung der Hanfpalme in den Tessiner Wäldern geführt (WALTHER et al., 2007). Dieses Bild muss jedoch um den einschränkenden Effekt der mangelnden Frosthärte temperatursensitiver Arten komplementiert werden. Arten oder Provenienzen südlicher Herkunft haben zudem geringere Ansprüche an die Kältesumme im Winter für den Austrieb im Frühjahr und können nach milden Wintern bei hohen Temperaturen im Frühjahr schon sehr früh mit einem Austrieb reagieren (WAY & MONTGOMERY, 2015). Gerade dieser frühe Start in die Vegetationsperiode erhöht aber das Risiko von Spätfrostschäden für südliche Provenienzen und Arten erheblich (WAY & MONTGOMERY, 2015).

Einen Nachweis der Zunahme von Störungen der Wälder durch extreme Witterungsereignisse, z. B. Stürme, ist schwierig (LINDNER et al., 2014). Dies lässt sich mit den sich überlagernden Einflüssen von Waldbewirtschaftung und dem damit einhergehenden Bestandsaufbau und der Artenzusammensetzung sowie dem Einfluss des Klimawandels erklären (SEIDL et al., 2012). Mehr als die Hälfte des beobachteten Anstiegs der Störungen an Kalamitäten durch Käfer, Waldbrände und Stürme lässt sich durch den Zustand der Wälder erklären und die andere Hälfte durch die Einflüsse des Klimawandels. Dies unterstreicht in Bezug auf eine Resilienz und eine Minimierung der schädlichen Einflüsse des Klimawandels auf Gehölze die Bedeutung eines angepassten Managements.

Über die letzten Dekaden lässt sich jedoch für Wälder aufgrund eines höheren Gehaltes an CO₂ in der Atmosphäre und einer damit gesteigerten Netto-Photosynthese eine Zuwachssteigerung nachweisen (MEDLYN et al., 1999; HYVÖNEN et al., 2007). So entwickeln Bäume unter einem erhöhten CO₂-Gehalt eine höhere Blattanzahl und folglich eine größere Blattfläche (AINSWORTH & LONG, 2005). Für *Liquidambar styraciflua* führt ein erhöhter CO₂-Gehalt zu einem höheren Anteil nicht verholzter Feinwurzeln (NORBY et al., 2004), während dies für *Pinus taeda* zu einer höheren Biomasse der verholzten Pflanzenteile führt (HAMILTON et al., 2002). Die Auswirkungen des Klimawandels auf Gehölze sind also auch an die Effekte eines höheren CO₂-Gehaltes gekoppelt. Allgemein treten nach den anfänglich hohen Steigerungen der Netto-Primärproduktion unter einem erhöhten CO₂-Gehalt in einer Phase der Akklimatisierung zunehmend andere Faktoren für das Wachstum in den Vordergrund. Obwohl sich auch Einflüsse wie eine hohe Schadstoffbelastung, z. B. aufgrund einer hohen Ozon-Konzentration, oder eine Veränderung des Spektrums von Pathogenen wachstums- und vitalitätsmindernd auswirken, kommt den direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels ein besonderer Stellenwert zu. So ist der Trend der Zuwachssteigerung unter einem erhöhtem CO₂-Gehalt nicht generalisierbar und viele Studien der letzten Jahre verweisen auf abnehmende Zuwachsleistungen und Vitalitätsminderungen für viele Baumarten (PIAO et al., 2011; SARRIS et al., 2011; VICENTE-SERRANO et al., 2010). Ein Anstieg des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre wirkt sich nämlich nur förderlich auf die Netto-Photosynthese und folglich positiv auf das Wachstum aus, wenn andere Ressourcen nicht begrenzend wirken. Obwohl derzeit keine verläss-

liche Aussage bezüglich einer möglichen Veränderung von Trockenperioden für den Berlin-Brandenburger Raum getroffen werden kann, so waren und sind bereits heute lang anhaltende Trockenperioden während der Wachstumsperiode von drei Wochen keine Seltenheit. Somit ist unter anderem (nicht vorhandenes) Bodenwasser limitierend für das Pflanzenwachstum (PLIETZSCH, 2017).

Gehölze sind den sich ändernden Klimabedingungen jedoch nicht schutzlos ausgeliefert. Im Laufe der Evolution haben Pflanzen verschiedenste Adaptionsmechanismen entwickelt, die ihnen helfen, sich auf kurz- und langfristige Änderungen der Umweltbedingungen anzupassen (KORN, 2016). Diese Adaptionsmechanismen finden sich auf allen Ebenen der Pflanze und beinhalten genetische, molekulare, zelluläre, physiologische, metabolische, anatomische und morphologische Aspekte (KORN, 2016). Generell können für Pflanzen zwei Prinzipien der Reaktion auf einen äußeren Stress unterschieden werden: die Strategie des Ausweichens (escape) und die Strategie der Resistenz (resistance) (SITTE et al., 2002). Die erstgenannte Strategie des Ausweichens findet sich beispielsweise bei Geophyten oder bei annuellen Therophyten, welche Phasen ungünstiger Umweltbedingungen entweder mithilfe ihrer Überdauerungsorgane überstehen, oder für ihren Lebenszyklus gezielt Phasen mit günstigen Umweltbedingungen nutzen und ungünstige Phasen als Samen überdauern (SITTE et al., 2002). Als mehrjährigen, langlebigen Pflanzen steht Gehölzen vor allem die Strategie der Resistenz zur Verfügung. Diese Resistenz kann entweder durch eine Vermeidungsstrategie (avoidance) oder einer Ertragsstrategie (tolerance) erfolgen. Um Wasserverluste zu vermeiden, können beispielsweise die Spaltöffnungen der Blätter geschlossen werden, ein tief reichendes Wurzelsystem ausgebildet, oder Blätter und Zweige abgeworfen werden (KORN, 2016). Auch kann sich auf lange Sicht das Spross-Wurzel-Verhältnis zugunsten der Wurzel entwickeln, was die Wasseraufnahme begünstigt. Anders reagieren Pflanzen, die der Strategie des Ertragens folgen. Durch eine hohe Toleranz gegenüber Dehydration und das Aufrechterhalten der Wasseraufnahme wird versucht, die Photosynthese und Transpiration auf einem hohen Niveau zu halten. Eine wichtige Rolle spielt hier die Osmoregulation, mit deren Hilfe unter einer Akkumulation osmotisch aktiver Komponenten die Wasseraufnahme befördert wird (KORN, 2016). Ein adaptives Management im Umgang mit den Effekten des Klimawandels kann helfen, die negativen Auswirkungen zu begrenzen. Von primärer Bedeutung ist deshalb, die Effekte und deren Auswirkungen auf die Vegetation und die Gehölze zu kennen. Jede Pflanzenart und jedes Entwicklungsstadium jeder Art reagiert jedoch unterschiedlich auf veränderte klimatische Bedingungen (LINDNER et al., 2014). Es muss deshalb betont werden, dass die in Tabelle 3 aufgelisteten Reaktionen allgemein formuliert sind und die Auswirkungen des Klimawandels auf Solitäre und Gehölzbestände von vielen verschiedenen Faktoren abhängig sind, insbesondere von der Gehölzstruktur, dem Alter, der genetischen Ausstattung, der Konkurrenz sowie den Standort-, Boden- und mikroklimatischen Bedingungen.

Abbildungsverzeichnis (Kapitel 2.2)

Abbildung 1: Mittlere jährliche Lufttemperatur in 2 m Höhe (Tmean, schwarz Linien) und jährliche Niederschlagssumme (ND, graue Balken) an der Messstation Potsdam (52,3813° N; 13,0622° O; 81 m ü.NN) von 1901–2010. Die gestrichelte Linie zeigt den linearen Trend von Tmean (0,1 K/Dekade, $p < 0,001$), die dicken Linien den jeweiligen 30-jährigen gleitenden Mittelwert von Tmean und ND. Datenquelle: DWD (2017). (D. Fenner, 2017).

Tabellenverzeichnis (Kapitel 2.2)

Tabelle 1: Jährliche und saisonale Mittelwerte und Trends ausgewählter klimatologischer Größen an der Messstation Potsdam (52,3813° N; 13,0622° O; 81 m ü.NN) für verschiedene Zeiträume. Tmean: Tagesmittelwert der Lufttemperatur in 2 m Höhe; Tmin: Tagesminimum der Lufttemperatur in 2 m Höhe; Tmax: Tagesmaximum der Lufttemperatur in 2 m Höhe. Frühling: März, April, Mai; Sommer: Juni, Juli, August; Herbst: September, Oktober, November; Winter: Dezember, Januar Februar. Statistisch signifikante Trends innerhalb der jeweiligen Zeiträume sind in eckigen Klammern als Wert pro Dekade (zehn Jahre) angegeben: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Datenquelle: DWD (2017); eigene Auswertungen. (D. Fenner, 2017).

Tabelle 2: Ausgewählte klimatologische Kennwerte und Trends für verschiedene Zeiträume an der Messstation Potsdam (52,3813° N; 13,0622° O; 81 m ü.NN). ND10/ND20: Niederschlagsereignisse mit mehr als 10 bzw. 20 mm/Tag (d); TT: Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage mit Niederschlag < 1 mm/d pro Jahr; WPLänge: Wachstumsperiode, nach FRICH et al. (2002); WPBeginn: Beginn der Wachstumsperiode; WPEnde: Ende der Wachstumsperiode; SF-1: Spätfrosttage (Tagesminimum der Lufttemperatur < -1 °C) nach Beginn der Wachstumsperiode; SF-5: Starke Spätfrosttage (Tagesminimum der Lufttemperatur < -5 °C) nach Beginn der Wachstumsperiode; HW: Hitzewellen, nach HUTN et al. (2000); HWTage: Hitzewellentage; HWDauer: Hitzewellendauer. Für ND10, ND20 und TT wurden zudem die Werte innerhalb der Wachstumsperiode ermittelt (zweite Zahl im jeweiligen Feld). Alle Ergebnisse wurden auf ganze Tage gerundet. Statistisch signifikante Trends sind in eckigen Klammern als Wert pro Dekade (zehn Jahre) angegeben: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. DOY: Day of year/Tag des Jahres. Datenquelle: DWD (2017); eigene Auswertungen. (D. FENNER, 2017).

Tabelle 3: Klimatische Effekte und Auswirkungen auf Gehölze nach AHRENDT et al. (2009), BOLTE et al. (2009), CHMURA et al. (2011), CHOAT et al. (2012), LINDNER et al. (2014), WILLIAMS et al. (2015). (S. GILLNER, 2017).