

Ozonbelastung der Wälder

Neueste Forschungsergebnisse unterstreichen die schädliche Wirkung von Ozon

Manuela Baumgarten und Rainer Matyssek

Die »Ozon-Alarm«-Meldungen und Berichterstattungen in den Medien haben in den letzten Jahren nachgelassen, obwohl die Konzentrationen bodennahen Ozons auch seit dem letzten Jahrzehnt weiter ansteigen. Ozon ist ein reaktives Gas, dessen potentielle Toxizität für Mensch, Tier und Pflanzen seit langem bekannt ist. Das konkrete Ausmaß der Schädigung auf die sich langfristig entwickelnden Baumbestände ist auf Grund vielfältiger Umwelteinflussfaktoren schwierig quantitativ zu erfassen. Eine Belastung des Baumwachstums ist jedoch seit langem mehrfach erwiesen. Dennoch werden regelmäßig die gesetzlichen Vorgaben oder von der UNECE vorgeschlagenen Richtwerte zum Schutz der Vegetation ohne Konsequenzen überschritten.

Die troposphärische Ozonkonzentration hat sich seit der vorindustriellen Ära ab dem 19. Jahrhundert mehr als verdreifacht (Hauglustaine et al. 2001; Claude et al. 2001; Lelieveld und Dentener 2000). Wir können davon ausgehen, dass Emissionen von Ozonvorläuferstoffen in den immer stärker wachsenden industrialisierten Regionen weltweit zu einem Anstieg der mittleren Ozonkonzentrationen führen. Mit Trajektorienanalysen zeigte Fabian (2002), dass auf Grund trans- und interkontinentaler Luftzirkulation Immissionen nicht nur innerhalb Europas, sondern auch aus Nord-Amerika und Asien einen bedeutsamen Beitrag zur hiesigen regionalen, troposphärischen Ozonbildung und -verbreitung leisten (vgl. Amann et al. 2005). Ashmore (2005) warnt, dass ein weiterer Anstieg der Ozonregime die Erfolge nationaler Immissionssenkungen teilweise einschränken oder sogar aufheben kann. Aktuell bedeutet dies für Mitteleuropa eine Zunahme der jährlichen Mittelwerte der Ozon-Hintergrundkonzentration (Coyle et al. 2003; Vingarzan 2004; Derwent et al. 2008; Fowler et al. 2008), die sich derzeit auf einem Niveau um etwa 30 ppb (parts per billion) bewegen. Am meteorologischen Observatorium des Deutschen Wetterdienstes am Hohenpeißenberg (Landkreis Weilheim-Schongau) existiert eine der längsten Messzeitreihen zur Entwicklung des troposphärischen bodennahen Ozons. Wie auch an anderen Stationen Mitteleuropas zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Ozonkonzentrationen von circa 30 auf fast 45 ppb seit 1971 (Abbildung 1, Gilge et al. 2010).

Bodennahes Ozon – Fakten und Trends

Modelle für das 21. Jahrhundert prognostizieren, dass das troposphärische Ozon bis zum Jahr 2100 weltweit durchschnittlich durchaus um weitere 20 ppb ansteigen könnte (Prather et al. 2003). Nach globalen Modellierungen von Sitoh et al. (2007) kommt es in Europa zu einem ähnlichen Anstieg, was gegenüber vorindustrieller Ozonbelastung zu einem Verlust an pflanzlicher Bruttopräproduktion von bis zu 30 Prozent führen soll.

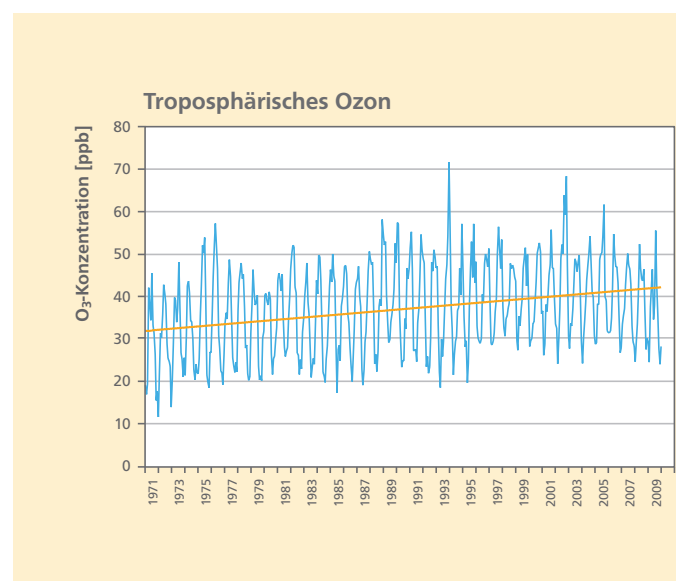


Abbildung 1: Konzentration des troposphärischen bodennahen Ozons am meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes (Landkreis Weilheim-Schongau) von 1971–2010; Monatsmittelwerte, orange Linie: linearer Trend (Gilge et al. 2010). [Mit freundlicher Genehmigung von S. Gilge]

Damit gewinnt das bodennahe Ozon als »Global Change Faktor« weiter an Bedeutung. Als Klimawandel-Komponente trägt es neben den »klassischen Treibhausgasen« Kohlendioxid, Stickoxiden und Methan sowie Wasserdampf nicht nur unmittelbar zu einer Erhöhung des Strahlungsantriebes und damit zur Klimaerwärmung bei, sondern es beeinflusst auch indirekt den Kohlenstoff-Kreislauf zwischen den Landoberflächen und der Atmosphäre durch Einschränkung der Kohlenstoff-Fixierung und -speicherung. Auf Grund der zellschädigenden Wirkung von Ozon kommt es zur Senkung der Photosyntheseleistung und zu Entgiftungsreaktionen. Beide führen zu Wachstumseinbußen und damit zur verringerten Fixierung der Vegetation von Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre. Dem potentiellen und begrenzten »CO₂-Dünge-Effekt« wirkt die Wachstumslimitierung durch Ozon in unterschied-

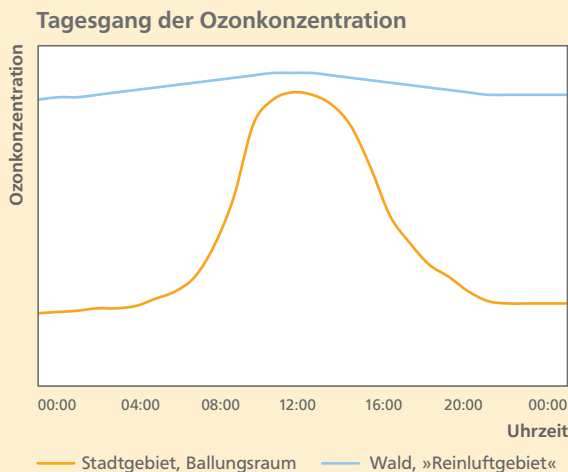


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines typischen Tagesganges der bodennahen Ozonkonzentration in Stadtgebiet/ Ballungsraum und Wald/Reinluftgebieten.

lichem Ausmaß entgegen. Schätzungen gehen davon aus, dass die indirekte Klimawirkung von Ozon durch verminderte Biomassebildung etwa genauso groß ist wie seine direkte als atmosphärisches Treibhausgas. Die etablierten globalen Klima- und Kohlenstoff-Modelle berücksichtigen zwar den Dünge-Effekt durch CO₂, bisher aber nicht die gegenteilige Wirkung von Ozon (vgl. Sitch et al. 2007).

Die erhöhten Ozonkonzentrationen werden größtenteils vom Ort des Emittenten (Industrie, Verkehr, Verbrennung) in die äußeren Bereiche von Ballungszentren und weiter entfernt in sogenannte Reinluftgebiete transportiert und bleiben dort wegen fehlender Ozon-Abbauprodukte auf hohem Niveau. So kommt es zu den erhöhten Ozon-Belastungen auch in ländlichen Regionen (Abbildung 2).

Wirkung von Ozon auf die Vegetation

Ozon wird während der Photosynthese und der Transpiration passiv durch Diffusion über die Schließzellen (Stomata) aufgenommen (= phytotoxische Ozondosis, POD). Die Ozonaufnahme kann zu akuten Schädigungen der Blätter als Reaktion auf kurzfristige Perioden mit hohen Ozonwerten führen, meist ist jedoch mit chronischen Zell- und Gewebeschädigungen, gestörtem Membrantransport, eingeschränkter Photosyntheseleistung und erhöhten »Entgiftungskosten« zu rechnen. Die sichtbaren Blattsymptome entwickeln sich über Tage und Wochen nach der Ozoneinwirkung und führen zu flächigen Vergilbungen, Pigmentierung, Nekrosen, frühzeitigem Blattalterung oder vorzeitigem Blattfall (vgl. Hartmann et al. 1995; Innes et al. 2001; Matyssek und Sandermann 2003).

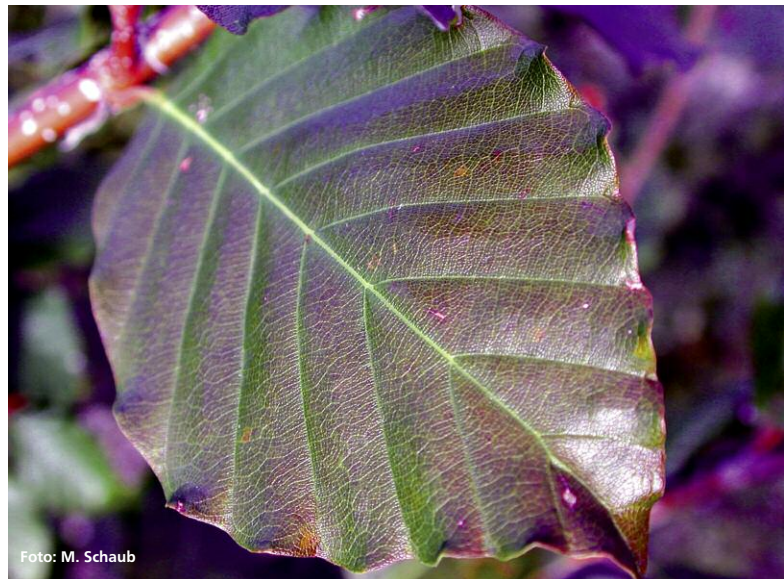


Abbildung 3: Ozon-bedingte hellgrüne bis gelbe bzw. bräunliche Chlorosen und Nekrosen (»Bronzing«) an einem Buchenblatt

An bayerischen Waldklimastationen wurden wiederholt visuell sichtbare ozonbedingte Schadsymptome an lichtexponierten Waldrändern dokumentiert. Schadsymptome finden sich hauptsächlich auf den Blattoberflächen, meist treten sie in Form von Flecken oder Verfärbungen in den Feldern zwischen den Blattnerven auf, oftmals kommt es zum Absterben des betroffenen Zellbereiches (Nekrose). Abbildung 3 zeigt ozonbedingte Schadsymptome an einem Buchenblatt. Zu sehen sind hellgrüne bis gelbe bzw. bräunliche Chlorosen und Nekrosen (»Bronzing«). Die Ausprägung ozonbedingter Symptome an der Belaubung ist zum Teil charakteristisch für unterschiedliche Baumarten, oft ist eine eindeutige Diagnose nur mit Hilfe einer umfassenden Schadansprache (Differentialdiagnose) möglich. Das Fehlen akuter, sichtbarer Schäden an der Belaubung schließt eine chronische ozonbedingte Schädigung auf einer anderen Organebene jedoch nicht aus.

Als Folge der Schädigungen sind letztendlich Ertragseinbußen zu erwarten. Für landwirtschaftliche Nutzpflanzen wurden ozonbedingte wirtschaftliche Schäden in Milliardenhöhe geschätzt (z.B. Murphy et al. 1999; Holland et al. 2002; Morgan et al. 2006). Entsprechende Schätzungen sind wegen der multifaktoriell wirkenden Umwelteinflüsse (Spiecker 1999) und der Langlebigkeit von Waldbeständen schwierig zu erstellen. In jüngster Zeit konnte jedoch im Freiland an adulten Bäumen der Nachweis für ozonbedingte Produktionseinbußen erbracht werden (z.B. Retzlaff et al. 2000; Dittmar et al. 2003, 2005; Karnosky et al. 2005, 2007). Im langjährigen Freiland-Ozonbe-gasungsexperiment an Waldbäumen im Kranzberger Forst bei Freising wurden bei einer Verdoppelung der Ozonkonzentration Zuwachseinbußen an adulten Buchen von mehr als 40 Prozent festgestellt (Pretzsch et al. 2010; Matyssek et al. 2010) (siehe Kasten S. 20).

Überschreitung des Schwellenwertes für AOT40 für Waldbäume

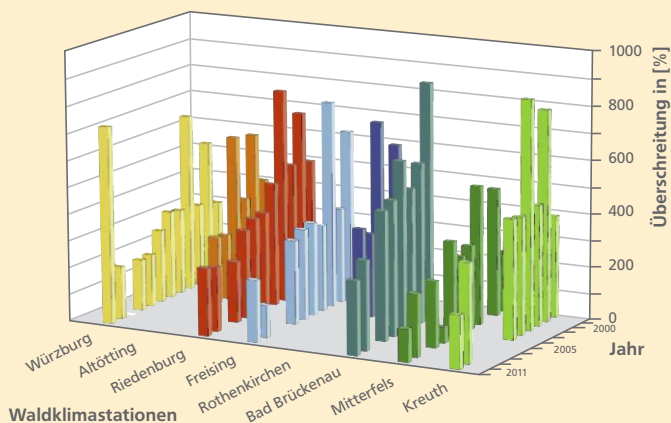


Abbildung 4: Prozentuale Überschreitung des AOT40-Schwellenwertes für Waldbäume an verschiedenen Waldklimastationen in den Jahren 2000–2011 (Fehlstellen: keine Werte vorhanden)

Entwicklung der Ozonbelastung der Wälder in Bayern

Hohe Ozonkonzentrationen der bodennahen Luft während der Vegetationsperiode und zumindest zeitweise Trockenheit während der Sommermonate sind für Europa und Nord-Amerika charakteristisch (Coyle et al. 2003; Bytnerowicz et al. 2004; Ciaï et al. 2005).

Als sicher gilt, dass auf zahlreichen Waldstandorten Bayerns mit einer zunehmenden, zunächst räumlich begrenzten temporären Wasserlimitierung zu rechnen ist, die das Anbaarisiko einzelner Baumarten in Bayern erhöht (Kölling et al. 2007; Kölling und Zimmermann 2007). Ebenso wird die bodennahe Ozonbelastung weiter ansteigen (z.B. Coyle et al. 2003; Vingarzan 2004; Ashmore 2005; Bytnerowicz et al. 2004; Rebetz et al. 2006; Fowler et al. 2008) und das bereits bestehende aktuelle Ozonrisiko zunehmen (Baumgarten et al. 2009).

Forstliche Schäden und Einbußen im Produktionspotential von Waldbäumen bei Trockenheit (Extremereignisse, wiederkehrende temporäre Wasserlimitierung in verschiedenen Bodenschichten) sind gerade aus der nahen Vergangenheit bekannt (Ciaï et al. 2005; Löw et al. 2006). Die Ozonexposition als weitere Einflussgröße des »Climate Change« ist ein zusätzlicher, trockenstressbeeinflusster Belastungsfaktor für die Waldbäume (Matyssek und Sandermann 2003; Matyssek et al. 2006, 2007).

Eine Bewertung von Produktionseinbußen infolge Wasserlimitierung und/oder Ozonbelastung ist auch im Kontext des Kyoto-Protokolls und der landes- und bundesweiten Ziele zur Minderung von Treibhausgasen von außerordentlich hoher ökonomischer und umweltpolitischer Bedeutung (Kohlenstoffsenkenfunktion der Wälder).

Phytotoxische Ozondosis (POD) für Waldbäume

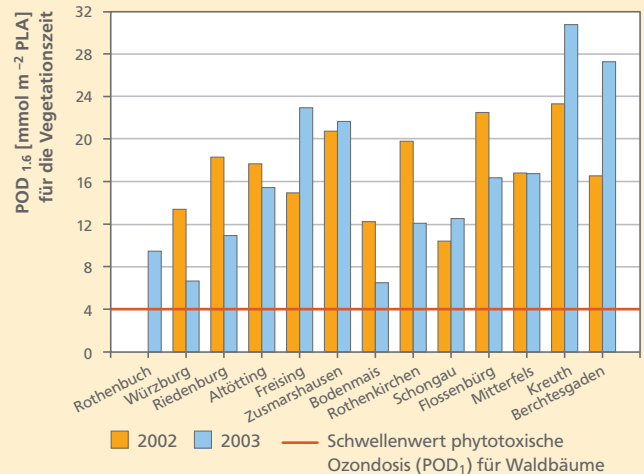


Abbildung 5: Phytotoxische Ozondosis für Waldbäume (POD_1) mit Überschreitung des Schwellenwertes (rote Linie) für verschiedene Waldklimastationen im klimatisch eher durchschnittlichen Jahr 2002 und dem Extrem-Trockenjahr 2003 (modelliert mit DO_3SE , Emberson et al. 2000, 2007)

Der Critical Level »AOT 40« [5 ppm*h (parts per million mal Stundenanzahl) für die Vegetationsperiode, UNECE 2004], ein derzeit noch für Vegetation verwendeter externer Ozon-Expositions-Schwellenwert, wird seit vielen Jahren auf allen untersuchten Waldflächen in Bayern größtenteils weit überschritten (Abbildung 4) (AOT 40 = *accumulated ozone exposure over a threshold of 40 ppb* for the growing season, Fuhrer und Achermann 1994; PLA = *projected leaf area*, Karlsson et al. 2004). Mittlerweile herrscht wissenschaftlicher Konsens,

- dass die externe Ozonexposition, wie sie mit dem AOT40 bestimmt wird, phytotoxisch nicht relevant ist und für die Bewertung von O_3 -Risiken irreführend sein kann (Löw et al. 2006, Matyssek et al. 2007),
- dass erst die Quantifizierung der tatsächlichen Ozonaufnahme über die Spaltöffnungen, welche die tatsächliche, physiologisch relevante Dosis darstellt, eine realistische Ermittlung des toxischen Potentials und somit eine fundierte Risikoabschätzung der Ozonwirkung auf Waldbäume möglich macht (Fuhrer und Achermann 1999; Musselmann und Massmann 1999; Matyssek und Sandermann 2003; Matyssek et al. 2004, 2007; 2008; Musselmann et al. 2006).

Die Ozonaufnahme kann mit Hilfe verschiedener Modelle bzw. auf Basis der Transpirationsermittlung mittels Xylemsaftflussmessung bestimmt werden (Matyssek et al. 2008). Derzeit schlägt die UNECE für Waldbäume den Schwellenwert POD_1 vor (POD_1 : flussbasierte phytotoxische Ozondosis, 4 mmol O_3 m^{-2} PLA für die Vegetationsperiode, UNECE 2010). Bei einer Überschreitung des POD_1 ist bei Waldbäumen mit Wachstumseinbußen von mindestens vier Prozent auszugehen.

»Free Air«-Forschung im Kranzberger Forst



Foto: K.-H. Häberle

Als wichtiger Faktor des Klimawandels erlangt troposphärisches Ozon vermehrt wissenschaftliche Aufmerksamkeit. Vor diesem Hintergrund wurde im Kranzberger Forst bei Freising eine einzigartige achtjährige »Free-Air«-Ozon-Begasungsstudie an Altbäumen der Buche und Fichte durchgeführt. Diese neuartige Begasungsmethode im Kronenraum erlaubte die Exposition von Baumindividuen unter zweifach erhöhtem O₃-Regime bei ansonsten unveränderten Standortbedingungen. Im Vergleich zu Individuen unter dem unverändert am Waldstandort vorherrschenden O₃-Regime war die Kohlenstoff-Senkenstärke im System Baum-Boden infolge verringerter Photosyntheseleistung, reduzierter Stammholzproduktion sowie erhöhter Bodenatmung geschwächt. Begleitende O₃-Effekte in Blättern und Wurzeln auf Gen-, Zell- und Organebene variierten zwischen den Jahren, wobei Trockenheit die O₃-Empfindlichkeit bestimmte. Während die Fichte unklare Reaktionen bei den Stammzuwächsen zeigte, ergab sich für die Buchen auf Bestandesebene eine ozonbedingte Abnahme der Stammproduktivität von 44 Prozent. Für Altbäume einer Klimaxbaumart wie Buche wird erstmals der experimentelle Nachweis erbracht, dass erhöhte O₃-Belastung substantiell das Bindungsvermögen von Wäldern für Kohlenstoff mit Relevanz für den Klimawandel einschränken kann. Resümee des »Free-Air«-Begasungsexperiments im Kranzberger Forst: *Erhöhter Ozonstress führt zu erheblicher Einschränkung der Kohlenstoffbindung in Altbuchen.*

Am Beispiel der Jahre 2002 (klimatisch durchschnittlich) und 2003 (extrem trocken-warm mit hohen Ozonkonzentrationen) konnte für Buchenbestände an verschiedenen bayerischen Waldklimastationen gezeigt werden, dass auch der POD-Schwellenwert (aus Modellberechnungen) auf allen untersuchten Waldstandorten in Bayern überschritten wird (Abbildung 5). Es zeigt sich hier jedoch deutlich der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Ozonaufnahme: obwohl die Ozonkonzentrationen 2003 ca. 20 % höher waren als 2002 ist die POD an eher trockenen Standorten (z.B. Würzburg, Riedenburg, Bodenmais, Rothenkirchen) deutlich niedriger als 2002.

Generell ist das aktuelle Ozonrisiko für bayerische Wälder gemäß der beiden gängigen Bewertungsmaßstäbe (AOT40, POD₁) als hoch einzuschätzen (Matyssek et al. 2007; Baumgar-

ten et al. 2009). Umfassende und statistisch abgesicherte Zuwachsuntersuchungen unter aktuellen Bedingungen im realen Bestand stehen derzeit nicht zur Verfügung. Der Nachweis von Zuwachseinbußen durch erhöhte Ozonbelastung an adulten Waldbäumen in Mitteleuropa wurde in der oben beschriebenen Studie im Kranzberger Forst erbracht. Experimentelle Fallstudien und Modellentwicklungen mit Waldbäumen weisen auf ozonbedingte Produktionseinbußen hin, welche die Größenordnung der potentiellen Ertragssteigerungen durch den Anstieg an Kohlendioxid in der Atmosphäre kompensieren oder überschreiten könnten. Zuwachseinbußen von Wäldern für Klimawandel-Szenarien erscheinen daher bisher unterschätzt. Weitere Untersuchungen an Waldbäumen für eine kritische Diskussion der Schwellenwerte zur realistischen Risikobeurteilung sind somit unbedingt notwendig.

Zukunft der Buche im Klimawandel bei zunehmender Trockenheit

Gegenwärtig ist ein fachlicher Diskurs über die Frage im Gange, ob die im Klimawandel als sehr anpassungsfähig eingeschätzte Buche wegen der Kombination der Einflussgrößen Trockenheit und Ozonbelastung besonders hohen Risiken ausgesetzt ist.

Im Rahmen der Klimaforschung Bayern (Klimaprogramm Bayern 2020) des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten wird derzeit ein Forschungsprojekt zur Bewertung der Leistungspotentiale der Buche im Klimawandel durchgeführt. Im Vordergrund stehen die Bewertung der Stresstoleranz der Buche und potentielle Produktionseinbußen auf einem breiten Standortsspektrum für Bayern. Zentrale Untersuchungsmethoden sind die kontinuierliche hochaufgelöste Stammzuwachsmessung sowie zugleich die Bestimmung der Baumtranspiration (Wasserverbrauch) und der individuellen Ozonaufnahme, beides ermittelt durch Xylemsaftflussmessung (Wieser et al. 2003, 2008; Nunn et al. 2007; Köstner et al. 2008; Matyssek et al. 2004, 2008). Mit dieser Vorgehensweise wird insbesondere für künftige Grenzstandorte eine neue, prozessgestützte quantitative Risikoeinschätzung mit Relevanz für den Klimawandel erreicht (vgl. LWF aktuell 87, Baumgarten et al. 2012).

Literatur

im Internet unter www.lwf.bayern.de

Dr. Manuela Baumgarten leitet das Projekt KLIP 15 »Risiken durch Trockenheit und Ozon für Bayerns Buchenbestände«, angestellt in der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft und am Lehrstuhl »Ökophysiologie der Pflanzen« der Technischen Universität München.

manuela.baumgarten@tum.de

Prof. Dr. Rainer Matyssek leitet den Lehrstuhl »Ökophysiologie der Pflanzen« der Technischen Universität. matyssek@wzw.tum.de