



Dr. Susanne Böll

Trockenstressreaktionen heimischer und nicht-heimischer Stadtbaumarten in Extremsommern

Trockenstressreaktionen heimischer und nicht-heimischer Stadtbaumarten in Extremsommern

Dr. Susanne Böll, Dr. Andreas Roloff, Konrad Bauer, Dr. Heiko Paeth, Marvin Melzer

Zusammenfassung

Bäume haben mehrere Möglichkeiten, auf Dürre- und Hitzeperioden zu reagieren: hohe Resilienz durch herkunftsbedingte, genetische Anpassungen (z.B. Hartlaubigkeit der Blätter), durch mittelfristige Anpassungen (Adaptionen), die im erst Folgejahr ausgeprägt werden (z.B. kleinere Blätter mit kleineren, aber zahlreicheren Spaltöffnungen) und Akklimationen, d.h. unmittelbare Reaktionen auf Trockenstress (z.B. Absenkung des Blattwasserpotentials). Anpassungsstrategien auf allen drei Ebenen werden für Stadtklimabaumarten aus dem Langzeitprojekt ‚Stadtgrün 2021‘ vorgestellt.

Einleitung

Der fortschreitende Klimawandel macht sich durch immer neue Rekorde zunehmend stärker bemerkbar (Deutscher Wetterdienst). Seit der Pflanzung der Versuchsbaumarten im Projekt „Stadtgrün 2021“ 2009/2010 waren neun von zwölf Vegetationsperioden überdurchschnittlich warm und trocken, vier kurz aufeinander folgende Sommer (2015, 2018, 2019, 2020) zählen als Extremsommer. Würzburg gilt mittlerweile als eine der trockensten und heißesten Städte in Deutschland, entsprechend hoch waren die monatlichen Temperatur- und Niederschlagsabweichungen 2018-2020 vom langjährigen Mittel (Abb.1+2). 2018 wurden 36 Hitzetage ($\geq 30^{\circ}\text{C}$; langjähriges Mittel: 7 Hitzetage) und während der Vegetationsperiode 219 mm Niederschlag (langjähr. Mittel: 370 mm) gemessen, 2019 27 Hitzetage und 256 mm und 2020 15 Hitzetage und 280 mm Niederschlag (DWD, Wetterstation Würzburg).

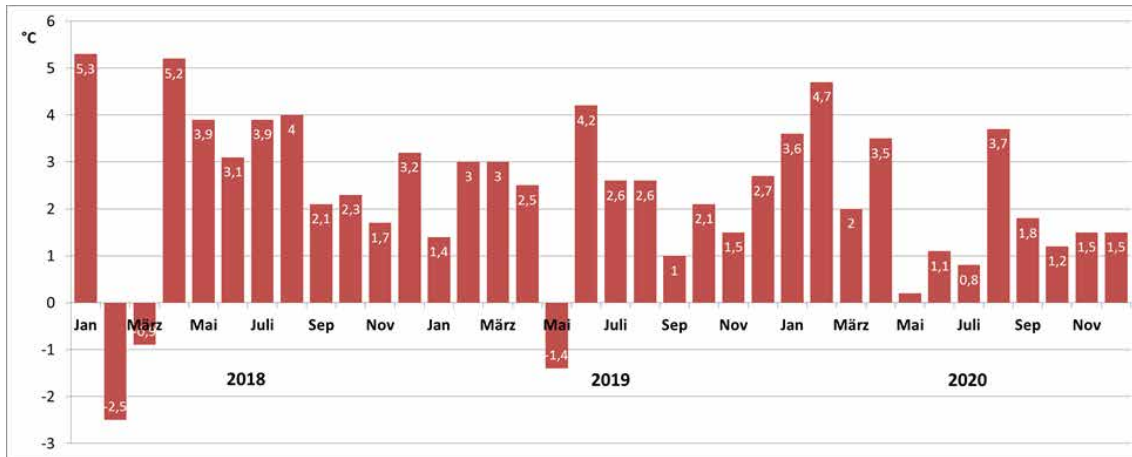


Abbildung 1: Monatliche Temperaturabweichungen in Würzburg vom langjährigen Mittelwert (1961 bis 1990)

Mit steigenden Temperaturen und zunehmenden Dürreperioden steigt die Evapotranspiration (Verdunstung + Transpiration der Pflanzen) stark an und führt zu einer noch schnelleren Austrocknung der Böden und Steigerung des Trockenstress der Bäume. Typisch heimische Stadtbaumarten wie Ahorn und Linde geraten zunehmend an die Grenzen ihrer lokalen Anpassungsfähigkeit, leiden verstärkt unter Trockenstress und zeigen sich immer anfälliger für Schädlinge und Krankheiten. Häufig werfen sie durch Trocken-, Hitze- und Salzstress bedingt bereits Anfang bis Mitte August ihre Blätter ab und erreichen die zum Wachstum für Laubbäume notwendige Vegetationsdauer von vier Monaten nicht mehr, was zu einem langfristigen „Verhungern“ und Absterben der Bäume führt (WALTER 1984). Kontinental geprägte, gebietsfremde Arten zeichnen sich in Zeiten des Klimawandels dagegen häufig durch eine höhere Stresstoleranz und damit auch höhere Vitalität und eine längere Belaubung aus, weshalb sie auch als ‚Stadtklimabäume‘ bezeichnet werden (BÖLL 2017).

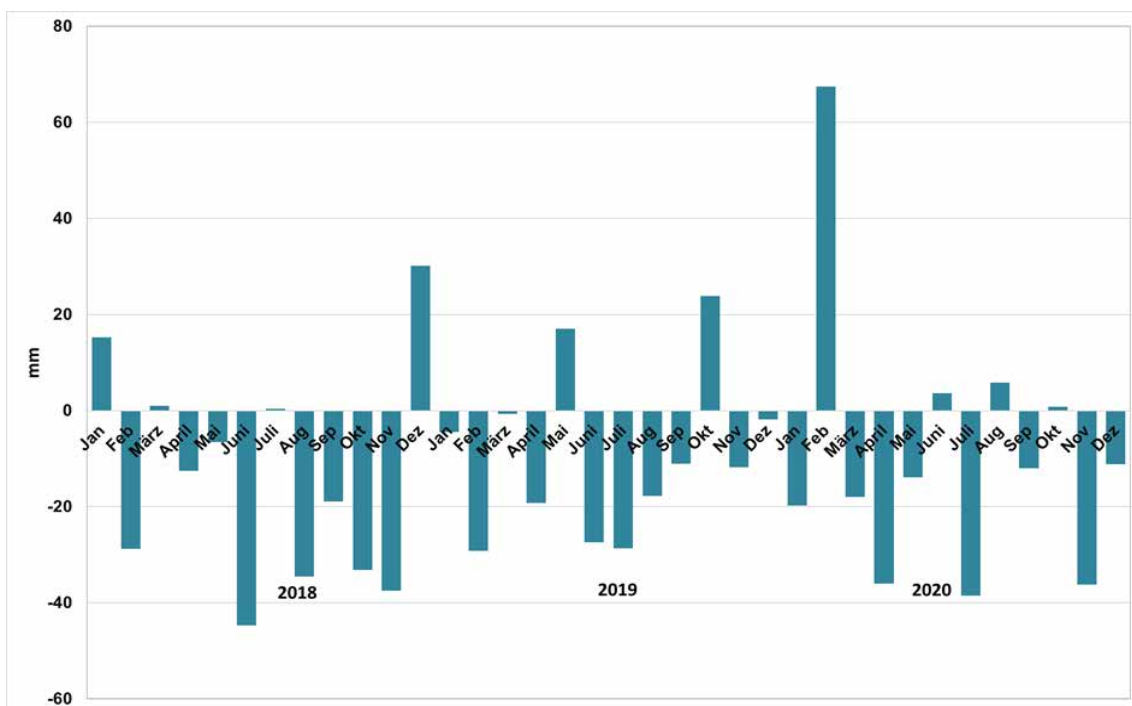


Abbildung 2: Monatliche Abweichungen der Niederschläge in Würzburg vom langjährigen Mittelwert (1961 bis 1990)

Anpassungsstrategien an Hitze- und Trockenstress

Bäume haben mehrere Möglichkeiten, auf Trocken- und Hitzeperioden zu reagieren (ROLOFF 2013), durch

- **genetisch fixierte, herkunftsbedingte Anpassungen**, morphologisch, z.B. ledrige Blätter mit stärkerer Wachsschicht auf der Epidermis, Behaarung und Einsenkung der Stomata auf Blattunterseite. Physiologisch durch die Fähigkeit zur schnellen Reaktion auf Trockenstress durch Stomataschluß (isohydrisches Verhalten durch Transpirationsverminderung, GILLNER et al. 2016, STRATOPOULOS et al. 2018 a,b) oder die Fähigkeit zur starken Absenkung des Blattwasserpotentials und damit Aufrechterhaltung der Photosynthese und Kühlung der Blätter (anisohydrisches Verhalten, Gillner et al. 2016, SJÖMAN et al. 2018)
- **Adaption - mittelfristige Anpassungen**. Bei wiederkehrenden Dürresommern bilden Bäume in den Folgejahren häufig Kurztriebe, sowie kleinere Blätter mit einer höheren Stomatadichte und kleineren Stomataöffnungen aus. Häufig wird auch der Wassergehalt der Blätter erniedrigt und der Sklerophyllgrad erhöht. Verschiebung der Investitionen im Wurzel /Sprossverhältnis (STRATOPOULOS et al. 2018 b) und Stamm/Sprossverhältnis (CHOAT et al. 2018).
- **Akklimation – kurzfristige Anpassungen**. Schnelle Reaktion auf Trockenstress durch Stomataschluß (isohydrisches Verhalten) oder Fähigkeit zu starken Absenkung des Blattwasserpotentials und damit Aufrechterhaltung der Photosynthese und Kühlung der Blätter (anisohydrisches Verhalten). Nutzung des Stammwassers, vor allem bei zerstreutporigen Baumarten. Senkrecht Stellen der Blätter (Heliotropismus, in der Oberkrone mittags), Wenden der hellen Unterseite der Blätter zur Sonne, Blattrollen ect.

Jede der Reaktionen kann zu einer verlängerten Vitalität der Blätter, späteren Blattfärbung und damit Verlängerung der Vegetationsperiode führen.

Bäume geraten aber mit zunehmender Häufung von extrem trocken-heißen Vegetationsperioden immer häufiger an ihre morphologischen und physiologischen Grenzen durch (zu) hohe Temperaturen, (zu) lange und intensive Einstrahlung, (zu) geringem pflanzenverfügbaren Wassergehalt im Boden, die zu nicht-adaptiven Einschränkungen und Schäden führen.

1. Genetisch fixierte, allgemeine Trockenstressanpassungen der Versuchsbaumarten

Tabelle 1: Genetisch fixierte, herkunftsbedingte Trockenstressanpassungen der verschiedenen Versuchsbaumarten

Versuchsbaumarten	Trockenstressanpassungen
<i>Acer buergerianum</i>	%
<i>Acer monspessulanum</i>	kleine, ledrige, glänzende Blätter
<i>Acer opalus</i>	derbe Blätter, helle Unterseite
<i>Acer rubrum</i> 'Somerset'	kleine Blätter (Blattwedeln)
<i>Alnus x spaethii</i>	gefiederte Blätter
<i>Carpinus betulus</i> 'Frans Fontaine'	derbe Blätter, sichtbare Hauptnerven
<i>Celtis australis</i>	derbe Blätter, sichtbare Hauptnerven, Blattrollen ("Schiffchenbildung")
<i>Eucommia ulmoides</i>	glänzende Blätter
<i>Fraxinus ornus</i>	derbe Blätter
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> 'Summit'	gefiederte Blätter
<i>Ginkgo biloba</i>	derbe Blätter
<i>Gleditsia triacanthos</i> 'Skyline'	gefiederte Blätter, lichte Krone
<i>Juglans nigra</i>	gefiederte Blätter
<i>Liquidambar styraciflua</i>	glänzende Blätter, Korkleisten
<i>Magnolia kobus</i>	%
<i>Malus tschonoskii</i>	silberne Blattunterseite
<i>Ostrya carpinifolia</i>	derbe Blätter, sichtbare Hauptnerven/ verdickte Leitungselemente
<i>Parrotia persica</i>	dunkelrote Blattverfärbung (trotzdem strahlungsempfindlich)
<i>Quercus cerris</i>	ledrige, kleine Blätter
<i>Quercus x hispanica</i> 'Wageningen'	kleine, derbe Blätter, Korkleisten
<i>Quercus frainetto</i> 'Trump'	glänzende, dick-ledrige Blätter
<i>Sorbus latifolia</i> 'Henk Vink'	glänzende Blätter, helle Unterseite, sichtbare Hauptnerven
<i>Styphnolobium japonicum</i> 'Regent'	gefiederte Blätter, grüne Triebe/ PS, lichte Krone
<i>Tilia americana</i> 'Redmond'	%
<i>Tilia mongolica</i>	kleine Blätter
<i>Tilia tomentosa</i> 'Brabant'	silberne Blattunterseite, dichter Haarfilz, eingesenkte Stomata, Blattdrehen + Heliotropismus
<i>Ulmus</i> 'Lobel'	derbe Blätter, sichtbare Hauptnerven
<i>Ulmus</i> 'Rebona'	glänzende, derbe Blätter
<i>Zelkova serrata</i> 'Green Vase'	gefiederte Blätter

Der überwiegende Anteil der Versuchsbaumarten stammt aus stark kontinental geprägten Herkunftsgebieten mit trocken-heißen Sommern und kalten Wintern.

Entsprechend zeigen diese Arten eine oder mehrere morphologische Anpassungen an Hitze- und Dürreperioden (ROLOFF 2013, Tab.1).

2. Anpassungsstrategien an Hitze und Trockenstress

2.1 Adaption durch „Trade-off“ der Investitionen

Bäume können in einem gewissen Maß ihre zur Verfügung stehenden Energien gezielt einsetzen und sogenannte „trade-offs“ eingehen. Z.B. können sie vermehrt in Fortpflanzung, also Früchten auf Kosten des Wachstums investieren. Aber auch das Wachstum kann in Abhängigkeit der Umweltbedingungen unterschiedlich auf die einzelnen Kompartimente, das heißt Wurzel, Stamm und Krone verteilt werden. So ist für einige Arten bekannt, dass sie bei

Trockenheit vermehrt in Wurzelwachstum investieren, um an tiefer vorhandene Wasserreserven zu gelangen (STRATOPOLOUS et al. 2018b). Vergleichende Wurzeluntersuchungen an den verschiedenen Standorten konnten wir im Rahmen des Projekts nicht durchführen, aber mögliche trade-offs zwischen Kronen- und Stammwachstum untersuchen. Der Stamm dient vor allem bei zerstreutporigen Baumarten als wichtiger Wasserspeicher.

Tabelle 2: Zuwachs des Stammumfangs seit der Pflanzung bis 2013 (linke Tab.) und bis 2019 (rechte Tab.) an den verschiedenen Standorten. Orange unterlegt: Standort mit dem stärksten Zuwachs der jeweiligen Baumart (Zuwachsdifferenz zu anderen Standorten mindestens 3cm).

2010 bis 2013

Versuchsbaumarten	Hof/ Münchberg	Kempten	Würzburg
<i>A. buergerianum</i>	7,4	3,8	9,1
<i>A. monspessulanum</i>	3,5	5,3	10,1
<i>Alnus x spaethii</i>	12,8	18,8	18,6
<i>C. betulus</i> Frans fontaine	6,0	3,2	6,5
<i>Celtis australis</i>		4,8	8,1
<i>Fraxinus ornus</i>	7,5	4,8	10,9
<i>F. pennsylvanica</i> Summit	7,3	5,8	5,3
<i>Ginkgo biloba</i>	2,5	4,0	5,8
<i>Gleditsia triacanthos</i> Skyline	5,3	4,5	4,1
<i>Liquidambar styraciflua</i>	7,0	6,0	8,3
<i>Magnolia kobus</i>	6,1	3,3	3,9
<i>Ostrya carpinifolia</i>	8,3	4,3	9,1
<i>Parrotia persica</i>	5,5	5,6	6,8
<i>Quercus cerris</i>	7,9	4,3	7,6
<i>Q. frainetto</i> Trump	4,0	5,1	11,4
<i>Q. hispanica</i> Wageningen	8,8	4,0	6,0
<i>Sophora japonica</i> Regent	9,3	5,8	7,4
<i>Tilia tomentosa</i> Brabant	12,4	4,8	12,0
<i>Ulmus</i> Lobel	10,5	10,0	8,4
<i>Zelkova serrata</i> Green Vase	7,6	10,4	10,0
Mittel	8,0	5,8	8,3

2010 bis 2019

Versuchsbaumarten	Hof/ Münchberg	Kempten	Würzburg
<i>A. buergerianum</i>	18,0	13,4	22,4
<i>A. monspessulanum</i>	16,5	15,8	27,6
<i>Alnus x spaethii</i>	36,5	53,1	43,9
<i>C. betulus</i> Frans Fontaine	14,8	13,5	21,6
<i>Celtis australis</i>	tot	18,4	26,0
<i>Fraxinus ornus</i>	29,8	20,6	34,3
<i>F. pennsylvanica</i> Summit	23,8	22,3	24,7
<i>Ginkgo biloba</i>	.	7,2	23,3
<i>Gleditsia triacanthos</i> Skyline	14,8	14,9	16,3
<i>Liquidambar styraciflua</i>	19,3	18,8	21,3
<i>Magnolia kobus</i>	24,9	18,0	16,5
<i>Ostrya carpinifolia</i>	21,5	16,5	31,8
<i>Parrotia persica</i> Vanessa	15,0	15,5	19,5
<i>Quercus cerris</i>	27,4	14,0	27,1
<i>Q. frainetto</i> Trump	18,1	22,8	39,7
<i>Q. hispanica</i> Wageningen	27,0	18,5	18,3
<i>Styphnolobium japonicum</i> Rega	38,9	25,8	25,7
<i>Tilia tomentosa</i> Brabant	40,6	21,5	31,8
<i>Ulmus</i> Lobel	26,2	36,2	27,3
<i>Zelkova serrata</i> Green Vase	23,0	31,0	26,8
Mittel	24,2	20,9	26,3

Seit Versuchsbeginn wird in den KW 37-39 der jährliche Zuwachs (cm) des Stammes, des Leittriebs und dreier Seitentriebe im oberen Kronenbereich für jeden Versuchsbaum an den drei Versuchsstandorten bestimmt (s.a. SCHÖNFELD & BÖLL 2021). Über die Hälfte der Baumarten zeigte an dem trocken-heißen Standort Würzburg einen deutlich stärkeren Zuwachs im Stammumfang als an dem regenreichen Standort Kempten (> 1000mm Niederschläge/ Jahr), der in den ersten Jahren auf Kosten des Kronenwachstums ging (Tab.2+3). Hof, das nur geringfügig feuchter, aber deutlich kühler als Würzburg ist, liegt bei den Stammzuwachs-investitionen in der Mitte (Tab.2).

Betrachtet man die Lebensbereiche, so gehören 62% der Arten, die verstärkt in Stammspeicher investieren, dem Lebensbereich 6 (Steppengehölze und Trockenwälder) nach KIERMEIER an (ROLOFF & BÄRTELS 2014), neben einzelnen Arten aus den Bereichen 3.1 („Artenreiche Wälder - Gehölzgruppen mit weiter Standortamplitude“) und 2 („Auen- und Ufergehölze“). Während die Zugehörigkeit zu den ersten beiden Gruppen nicht verwundert, erwartet man kaum Auengehölze als besonders anpassungsfähig. Allerdings haben Arten besonders der Hartholzaue häufig eine sehr breite Standortamplitude und sind habitatbedingt sowohl an Überschwemmungen (während des Frühjahrs), als auch an längere Trockenperioden (im Sommer) angepasst (s.a. Neubewertung der Klimaartenmatrix KLAM, ROLOFF 2021).

Tabelle 3: Rangliste der Kronenwüchsigkeit der einzelnen Baumarten im Standortvergleich, 2012 bis 2016. 1=höchster Zuwachs, 3=geringster Zuwachs.

Versuchsbaumarten	Würzburg					Hof / Münchberg					Kempten				
	2012	2013	2014	2015	2016	2012	2013	2014	2015	2016	2012	2013	2014	2015	2016
<i>A. buergerianum</i>	3	1,5	3	2	1	1	1,5	2	1	2	2	3	1	3	3
<i>A. monspessulanum</i>	2	2	1,5	3	1	1	1	1,5	2	2,5	3	3	3	1	2,5
<i>Alnus x spaethii</i>	3	2	3	3	3	2	3	2	2	2	1	1	1	1	1
<i>C.betulus</i> Frans fontaine	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2,5	3	3	3	3	2,5
<i>Celtis australis</i>															
<i>Fraxinus omus</i>	2	3	2,5	3	3	3	2	2,5	1	2	1	1	1	2	1
<i>F. pennsylvanica</i> Summit	3	2,5	1	3	1	1	1	3	2	2	2	2,5	2	1	3
<i>Ginkgo biloba</i>	1	1	2	2	1	3	3	3	3	3	2	2	1	1	2
<i>Gleditsia triacanthos</i> Skyline	3	2,5	1	3	1	1	2,5	3	2	3	2	1	2	1	2
<i>Liquidambar styraciflua</i>	3	3	2,5	3	2	1,5	1	2,5	2	3	1,5	2	1	1	1
<i>Magnolia kobus</i>	2,5	3	2,5	3	3	1	1	1	2	2	2,5	2	2,5	1	1
<i>Ostrya carpinifolia</i>	3	2	1	1	1	1	1	2	3	3	2	3	3	2	2
<i>Parrotia persica</i>	3	2,5	3	3	2,5	2	2,5	2	2	1	1	1	1	1	2,5
<i>Quercus cerris</i>	2,5	2,5	2	1	1	1	1	1	2	2	2,5	2,5	3	3	3
<i>Q. frainetto</i> Trump	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	2	2	2
<i>Q. hispanica</i> Wageningen	2,5	2	2,5	3	2	1	1	1	1	1	2,5	3	2,5	2	3
<i>Sophora japonica</i> Regent	3	3	3	3	3	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1
<i>Tilia tomentosa</i> Brabant	2	2	1	3	3	1	1	2	1	1	3	3	3	2	2
<i>Ulmus</i> Lobel	3	3	2	2	2	1	2	3	1	3	2	1	1	1	1
<i>Zelkova serrata</i> GV	2,5	3	1	3	1	1	2	2	2	3	2,5	1	3	1	2
Mittlerer Rang	2,5	2,2	1,9	2,4	1,8	1,4	1,7	2,1	1,9	2,3	2,1	2,1	1,9	1,6	2,0

2.2 Akklimation durch Verlängerung der Vegetationsperiode

Trotz eines Notbewässerungsprogrammes des Gartenamtes Würzburg für herkömmliche Stadtbaumarten zeigten viele Ahorne, Linden und Kastanien im Stadtgebiet in den extremen Hitzesommern 2015, 2018, 2019 bereits Ende Juli starke Trockenschäden und Mitte August verfrühten Blattfall. Im Gegensatz zu vielen Straßenbäumen war das Gros der Versuchsbäume im August in Würzburg vital und grün belaubt. Aber zeigten die Versuchsbäume dennoch eine wenn auch nicht so stark verfrühte Blattfärbung und damit verkürzte Vegetationsperiode, so dass geringere Nährstoffreserven für das Folgejahr eingelagert werden konnten?

Seit 2011 wird an allen Untersuchungsstandorten die jeweilige Kalenderwoche (KW) dokumentiert, in der jede Baumart Blattaustrieb, Blattverfärbung und Blattfall zeigt. Die Erhebungen zum Einsetzen der Blattfärbung in Würzburg und damit dem Ende der Photosynthese und Vegetationsperiode ergaben folgende interessante Ergebnisse (Tab.4-6):

Hitzesommer 2015 (Tab.4): Mittelt man die jeweilige Kalenderwoche (KW) der Blattfärbung der einzelnen Baumarten über die Jahre 2011 bis 2014 (s. letzte Spalte Tab.4) und vergleicht sie mit der jeweiligen KW 2015, so zeigt sich, dass nur drei Baumarten eine geringfügig verfrühte Blattfärbung gegenüber dem mehrjährigen Mittel zeigten, bei zwei Baumarten kein Unterschied festzustellen war und sich bei allen weiteren Baumarten eine spätere Blattfärbung als im Mittel zeigte. Entsprechend waren auch – mit Ausnahme von *Celtis australis* - bei keiner Art starke Wachstumseinbußen im Folgejahr zu beobachten.

Tabelle 4: Jeweilige Kalenderwoche (KW) der Blattfärbung der verschiedenen Baumarten, 2011 bis 2015

Würzburg	2011	2012	2013	2014	2015	2011-2014
<i>Acer buergerianum</i>	41	40	42	43	44	42
<i>Acer monspessulanum</i>	42	41	42	43	44	42
<i>Alnus x spaethii</i>	45	43	47	42	46	44
<i>Carpinus betulus</i> Frans Fontaine	39	39	43	44	42	41
<i>Celtis australis</i>	43	42	42	41	42	42
<i>Fraxinus ornus</i>	41	40	42	43	41	42
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Summit	35	36	40	38	40	37
<i>Ginkgo biloba</i> (männl. Selektion)	41	41	43	42	44	42
<i>Gleditsia triacanthos</i> Skyline	34	36	39	37	40	37
<i>Liquidambar styraciflua</i>	41	42	43	43	44	42
<i>Magnolia kobus</i>	36	38	42	42	45	40
<i>Ostrya carpinifolia</i>	43	42	43	43	41	43
<i>Parrotia persica</i>	42	43	43	43	44	43
<i>Quercus cerris</i>	41	42	43	44	43	43
<i>Quercus frainetto</i> Trump		43	42	43	44	43
<i>Quercus x hispanica</i> Wageningen	halb-immergrüne Art					
<i>Sophora japonica</i> Regent	41	41	42	40	43	41
<i>Tilia tomentosa</i> Brabant	42	43	43	44	41	43
<i>Ulmus</i> Lobel		42	44	45	45	44
<i>Zelkova serrata</i> Green Vase	43	41	41	40	43	41

Tabelle 5: Jeweilige Kalenderwoche (KW) der Blattfärbung der verschiedenen Baumarten, 2011 bis 2018. * ohne 2015

Würzburg	2011	2012	2013	2014	2016	2017	2018	2011-2017*
<i>Acer buergerianum</i>	41	40	42	43	43	40	41	42
<i>Acer monspessulanum</i>	42	41	42	43	43	42	41	42
<i>Alnus x spaethii</i>	45	43	47	42	46	44	43	45
<i>Carpinus betulus</i> Frans Fontaine	39	39	43	44	43	41	45	42
<i>Celtis australis</i>	43	42	42	41	42	39	41	42
<i>Fraxinus ornus</i>	41	40	42	43	42	41	40	42
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Summit	35	36	40	38	37	38	38	37
<i>Ginkgo biloba</i> (männl. Selektion)	41	41	43	42	45	42	40	42
<i>Gleditsia triacanthos</i> Skyline	34	36	39	37	36	36	36	36
<i>Liquidambar styraciflua</i>	41	42	43	43	44	43	41	43
<i>Magnolia kobus</i>	36	38	42	42	44	40	39	40
<i>Ostrya carpinifolia</i>	43	42	43	43	43	40	40	42
<i>Parrotia persica</i>	42	43	43	43	44	43	41	43
<i>Quercus cerris</i>	41	42	43	44	44	43	41	43
<i>Quercus frainetto</i> Trump		43	42	43	43	41	42	42
<i>Quercus x hispanica</i> Wageningen	halb-immergrüne Art							
<i>Sophora japonica</i> Regent	41	41	42	40	42	42	40	41
<i>Tilia tomentosa</i> Brabant	42	43	43	44	42	41	39	43
<i>Ulmus</i> Lobel		42	44	45	44	42	40	43
<i>Zelkova serrata</i> Green Vase	43	41	41	40	41	41	40	41

Hitzesommer 2018: hier ergibt sich ein anderes Bild (Tab.5): Dreiviertel der Baumarten zeigten eine geringfügig frühere Blattfärbung als im langjährigen Mittel (letzte Spalte Tab.3, gemittelt ohne Extremsommer 2015), aber verfärbten sich dennoch mit wenigen Ausnahmen und anders als die meisten gängigen Stadtb Baumarten in Würzburg erst im Oktober (KW 40-44). Dies war der Dürre des Sommers mit nur 217mm Niederschlägen während der Vegetationsperiode geschuldet. Aber auch hier waren nur bei wenigen Arten deutliche Wachstumseinbußen im Folgejahr zu beobachten (SCHÖNFELD & BÖLL 2021).

Tabelle 6: Jeweilige Kalenderwoche (KW) der Blattfärbung der verschiedenen Baumarten, 2011 – 2019. *ohne 2015, 2018.

Würzburg	2011	2012	2013	2014	2016	2017	2019	2011-2017*
<i>Acer buergerianum</i>	41	40	42	43	43	40	43	42
<i>Acer monspessulanum</i>	42	41	42	43	43	42	43	42
<i>Alnus x spaethii</i>	45	43	47	42	46	44	44	44
<i>Carpinus betulus</i> Frans Fontaine	39	39	43	44	43	41	44	42
<i>Celtis australis</i>	43	42	42	41	42	39	43	42
<i>Fraxinus ornus</i>	41	40	42	43	42	41	44	42
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Summit	35	36	40	38	37	38	41	37
<i>Ginkgo biloba</i> (männl. Selektion)	41	41	43	42	45	42	44	42
<i>Gleditsia triacanthos</i> Skyline	34	36	39	37	36	36	40	36
<i>Liquidambar styraciflua</i>	41	42	43	43	44	43	44	43
<i>Magnolia kobus</i>	36	38	42	42	44	40	45	40
<i>Ostrya carpinifolia</i>	43	42	43	43	43	40	45	42
<i>Parrotia persica</i>	42	43	43	43	44	43	43	43
<i>Quercus cerris</i>	41	42	43	44	44	43	44	43
<i>Quercus frainetto</i> Trump		43	42	43	43	41	43	42
<i>Quercus x hispanica</i> Wageningen		halb-immergrüne Art						
<i>Sophora japonica</i> Regent	41	41	42	40	42	42	40	41
<i>Tilia tomentosa</i> Brabant	42	43	43	44	42	41	44	43
<i>Ulmus</i> Lobel		42	44	45	44	42	43	43
<i>Zelkova serrata</i> Green Vase	43	41	41	40	41	41	44	41

2019, obwohl zweiter Hitzesommer in Folge, zeigte sich ein ähnliches Bild wie 2015 (Tab.6): nur eine einzige Baumart zeigte eine leicht verfrühte Blattfärbung, die überwiegende Mehrzahl der anderen Versuchsbaumarten verfärbte sich später als im langjährigen Mittel. Nur drei Baumarten zeigten Wachstumseinbußen als Folge des Steppensommers 2018.

Fazit für die Praxis: Sofern es sich nicht um einen durchgängigen „Steppensommer“ ohne nennenswerte Niederschläge mit nahezu durchgängigen Hitze- und Wüstentagen wie 2018 handelt, scheint ein Großteil der Versuchsbaumarten in der Lage zu sein, seine Blätter während extremer Hitzewellen vital zu halten (siehe 2.3.4). Dank dieser Strategie können entsprechende Assimilationsverluste während Hitzephasen durch eine längere Vegetationsperiode ausgeglichen werden.

2.3 „Fieberkurven“ während Hitzeperioden in Extremsommern

Um besser zu verstehen, wie kontinental geprägte Klimabaumarten in extremen Dürre- und Hitzesommern im Vergleich zu heimischen Straßenbäumen reagieren, wurden während der Extremsommer 2018-2020 folgende Fragen untersucht:

- Wie sehen die „Fieberkurven“ der einzelnen Baumkompartimente (Blätter, Rinde, Wurzelbereich) heimischer und südosteuropäischer Stadtbaumen in Extremsommern aus?
- Überschreiten die Temperaturen kritische Grenzwerte?
- Sind kontinental geprägte Arten besser in der Lage, ihre Blätter zu kühlen? Auch in aufeinanderfolgenden „Steppensommern“?

2.3.1 Meßtechnik und Methodik

2018 bis 2020 wurden am Versuchsstandort Würzburg Temperaturmessungen an zwei heimischen (Winterlinde, Hainbuche) und zwei südosteuropäischen Baumarten (Silberlinde, Hopfenbuche) an je 2 Bäumen durchgeführt. Es wurden die Temperaturverläufe von je 3 sonnenexponierter Blätter im oberen Kronenbereich, der Rindenoberfläche auf Nord- und Südseite sowie im obersten Wurzelbereich in 10 min (2018) bzw. 15 min Intervallen (2019) über die gesamte Vegetationsperiode gemessen, in Datenloggern gespeichert und 1x pro Woche über Mobilfunk an die Landesanstalt übermittelt. Die Rindentemperaturen (Bild 1) und die Temperaturen im oberen Wurzelbereich wurden mit Widerstandsthermometern gemessen. An den Blättern wurde mit in Reihe geschalteten Thermoelementen (Fa. Ecomatik, Dachau) die Differenz zwischen Blatt- und Lufttemperatur ΔT gemessen (Bild 2). Die Blatttemperatur wurde über die Summe ΔT und der in unmittelbarer Nachbarschaft des Blattes gemessenen Lufttemperatur (iButton/ Thermochron DS 1922, USA) errechnet (Bild 2).



Bild 1: Rindentemperaturmessung



Bild 2: Blatttemperaturmessung im Kronenbereich der Hopfenbuche

2.3.2 Maximale Baumtemperaturen

2019 wies Ende Juli mit nahe 40°C (DWD, Wetterstation Würzburg) eine noch heißere Hitzeperiode auf, als der Steppensommer 2018. Blatt-, Luft- und Rindentemperaturen überstiegen entsprechend die Maximalwerte von 2018 (Tab.7). Bei Baumarten mit dünner Rinde können Temperaturen mit deutlich über 40°C (siehe T Borke Süd) zum Absterben des Kambiums führen, darüber hinaus verursachen hohe

Temperaturunterschiede zwischen Nord- und Südseite (siehe delta T Borke Süd-Nord) starke Spannungen und können zu Rindenrissen mit fatalen Folgen führen.

Tabelle 7: Temperaturmaxima während der Steppensommer 2018 bis 2020

2018		2019		2020	
T Luft	41 °C	T Luft	43,4 °C	T Luft	40,6 °C
T Blatt	42,1 °C	T Blatt	44,5 °C	T Blatt	41,6 °C
Δ T Blatt-Luft	3,2 °C	Δ T Blatt-Luft	3,8 °C	Δ T Blatt-Luft	2,5 °C
Δ T Krone-Luft	- 10,7 °C	Δ T Krone-Luft	- 10,0 °C	Δ T Krone-Luft	
T Borke Süd	45,1 °C	T Borke Süd	49,9 °C	T Borke Süd	50,3 °C
Δ T Borke Süd-Nord	13,3 °C	Δ T Borke Süd-Nord	18,2 °C	Δ T Borke Süd-Nord	18,6 °C
T Substrat	62,4 °C	T Substrat	66,4 °C	T Substrat	63,3 °C

Fazit für die Praxis: Straßenbäume mit dünnen Rinden, die keine ausgeprägte Borke mit zunehmendem Alter entwickeln (Bsp. Hainbuche, Parrotie, Kobushi-Magnolie, ...), sollten nicht nur während der ersten Jahre nach der Pflanzung mit Tonkin-/Schilfrohmatten oder einem weißen Rindenanstrich vor Sonnenbrand geschützt werden, sondern in Zukunft durchgängig mit Stammschutz versehen sein.

2.3.3 Substrattemperaturen unter verschiedenen Mulcharten

Noch extremer sind die gemessenen Temperaturmaxima im Übergangsbereich von Substrat und Mulch von bis zu über 60°C (Tab.7), die auf die dunkle Farbe der verwendeten Lava als anorganischer Mulch zurückzuführen sind. Um herauszufinden, wie stark heller Mulch die Temperatur im oberen Substratbereich senken kann, wurde Anfang August 2019 in einem Tastversuch bei der Hälfte der Bäume eine dünne Schicht heller Holzhäcksel aufgebracht, die den Lavamulch gerade abdeckte. Die Temperaturverläufe vor und nach Ausbringen des Holzhäcksel wurden vergleichend für jede Baumart ausgewertet. Ab dem 5.8.2019 nach Ausbringen des Holzhäcksel zeigten die Substrattemperaturen einen stark gedämpften Verlauf im Vergleich zu den Temperaturen der Lavamulch-Variante, der bis zu 15°C Unterschied betrug (Bsp. Hainbuchen: Abb.3). Auch 2020, waren die Unterschiede in der Temperaturamplitude noch deutlich ausgeprägt, obwohl ein Teil des Holzhäcksel bereits verrottet war.

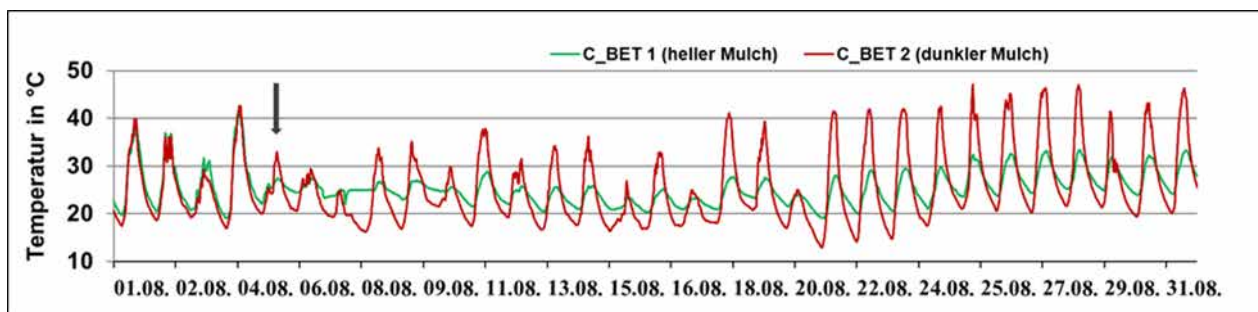


Abbildung 3: Temperaturen im oberen Substratbereich: Vergleich Lavamulch- und Holzhäckselabdeckung; Holzhäcksel wurde am 5.8.2019 ausgebracht.

Fazit für die Praxis: Als Mulch sollten nur helle organische oder anorganische Mulcharten verwendet werden, die eine relativ hohe Rückstrahlung gewährleisten. Baumunterpflanzungen auf Baumscheiben sollten nicht vor dem vierten Standjahr (in trocken-heißen Städten

erst ab dem 6.Standjahr) erfolgen, um eine ausreichende Bewässerung der Bäume ohne Wurzelkonkurrenz zu gewährleisten.

2.3.4 Kontrolle der Blatttemperaturen (genetisch fixierte Anpassung / Akklimation)

Südosteuropäische Baumarten sind durch ihre kontinental-eurasische Verbreitung in ihren natürlichen Habitaten während der Sommermonate höheren Hitze- und Strahlenbelastungen sowie längeren Dürreperioden ausgesetzt als heimische, zentral-europäische Baumarten. Entsprechend sollten diese Arten, insbesondere Lichtbaumarten, genetisch fixierte Anpassungen aufweisen, die es ihnen ermöglichen, unter solchen Klimabedingungen zu wachsen und gedeihen. Tatsächlich zeigen verschiedene Studien, dass südosteuropäischen Arten deutlich niedrigere Boden- und Blattwasserpotentiale erreichen, ohne den permanenten Welkepunkt zu überschreiten (SJÖMAN et al. 2018, KLEIN 2014), eine höhere Wassernutzungseffizienz und geringere Transpirationsraten während Hitzeperioden besitzen (STRATOPOULOS et al. 2018 a, b) und verschiedene morphologische Anpassungen wie ledrige oder behaarte Blätter (ROLOFF 2013) und stärkeres Feinwurzelswachstum (STRATOPOULOS et al. 2018b) aufweisen.

Auch unsere Ergebnisse der Blatttemperaturverläufe zeigen während anhaltender Hitzeperioden deutliche Unterschiede zwischen den heimischen Baumarten und ihren südosteuropäischen Verwandten, allerdings war diese Regulationsfähigkeit bei den Hopfenbuchen 2019/2020 nur noch eingeschränkt vorhanden.

Während niedriger Sommertemperaturen ($< 30^{\circ}\text{C}$) hatten die heimischen Hainbuchen und Winterlinden 2018 (und in den Folgejahren) gegenüber den südosteuropäischen Schwesternarten nur unwesentlich erhöhte Blatt-/Lufttemperaturdifferenzen und entsprechend ähnliche Blatttemperaturen. Die Differenzen nahmen jedoch mit zunehmenden Lufttemperaturen zu, so dass die heimischen Arten während lang anhaltender Hitze- und Trockenperioden deutlich höhere ΔT Werte als die beiden Südosteuropäer zeigten (Abb.4+6), was zu entsprechend höheren absoluten Blatttemperaturen führte (Abb.5). Bei den Hainbuchen lagen die Blatt-Luft-Temperaturdifferenzen bei bis zu 3°C , bei den Hopfenbuchen bei maximal $1,5^{\circ}\text{C}$. Bei den heimischen Winterlinden, die eurasisch wesentlich weiter verbreitet sind als die Hainbuchen, lagen die ΔT Werte während der Hitzeperioden selten über $1,5^{\circ}\text{C}$, damit auf dem Niveau der Hopfenbuchen und deutlich unter denen der Hainbuchen. Die Silberlinden zeigten mit max. $0,5^{\circ}\text{C}$ die geringsten Blatttemperaturerhöhungen (Abb.6).

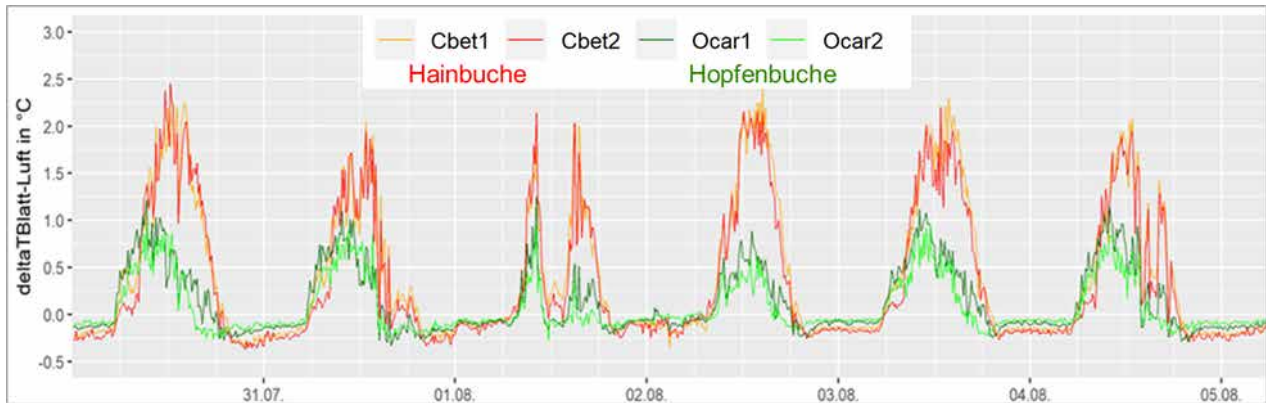


Abbildung 4: Differenz zwischen Blatt- und Lufttemperatur der Hain- und Hopfenbuchen: 30.7. bis 5.8.2018.

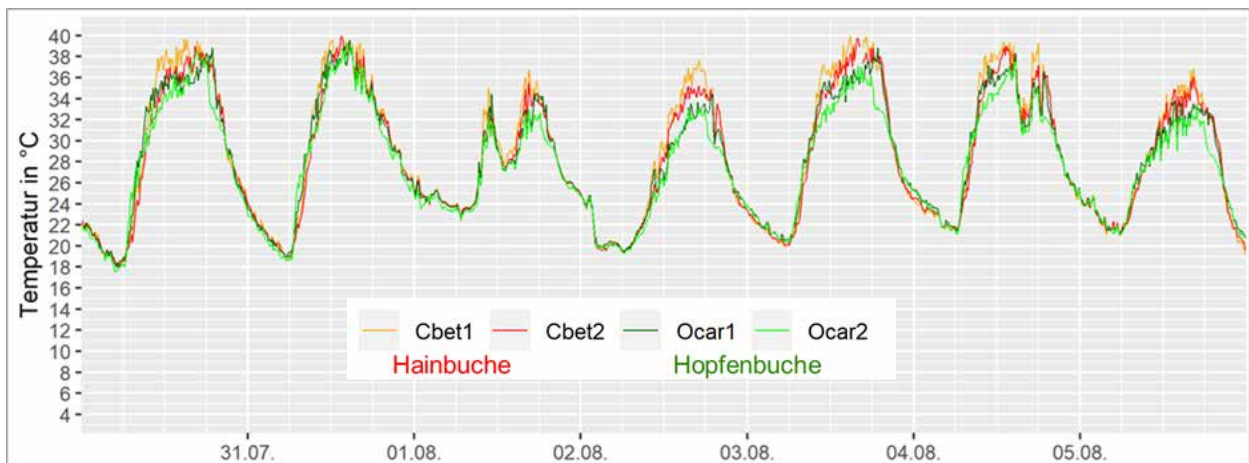


Abbildung 5: Blatttemperaturverlauf Hainbuchen vs. Hopfenbuchen: 30.7. bis 5.8.2018.

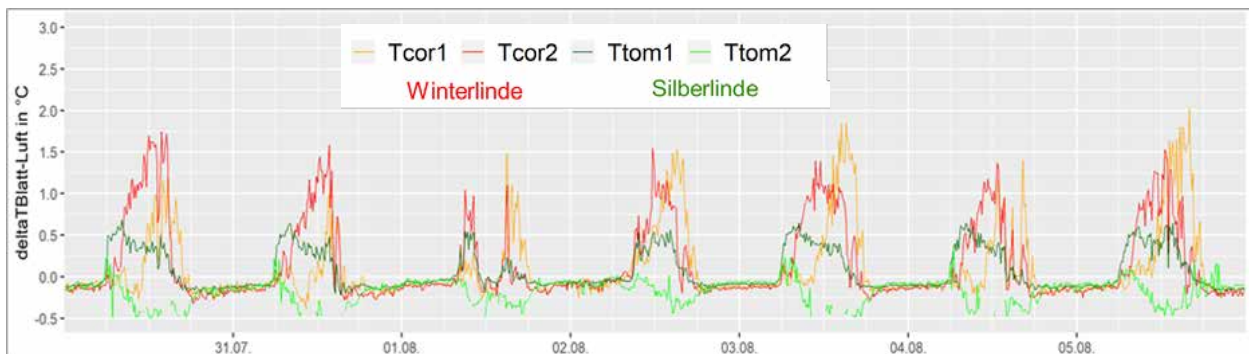


Abbildung 6: Differenz zwischen Blatt- und Lufttemperatur der Winter- und Silberlinden: 30.7. bis 5.8.2018.

Die Untersuchungen zeigen, dass südosteuropäische Baumarten in der Lage sind, ihre Blatttemperaturen besser zu kontrollieren als ihre heimischen Schwesternarten. Aber auch bei den beiden Südosteuropäern gab es Unterschiede: 2019, nach einem trockenen Frühjahr, wiesen die Hopfenbuchen während des zweiten Extremsommer in Folge im Gegensatz zu den Silberlinden keine systematischen Unterschiede in den delta T Werten mehr zu ihrer heimischen Schwesternart (Abb.7) auf, während die Linden ähnliche Temperatur-differenzverläufe zeigten wie 2018. Während der kritischsten Hitzeperiode Ende Juli war bei beiden Hopfenbuchen jedoch ein früherer Abfall der delta T Werte im Tagesverlauf zu beobachten als bei den Hainbuchen, was dazu führte, dass zwar auch eine der Hopfenbuchen Blatttemperaturen über

40°C, aber deutlich geringere Maximalwerte als die Hainbuchen (bis zu > 44°C) erreichte (Abb.8). Auch die Silberlinden überschritten nur punktuell die 40°C, während die Winterlinden Temperaturen von über 44°C erzielten. Bei Temperaturen > 40°C werden Proteine in den Blättern häufig geschädigt und können zum frühzeitigen Blattfall führen. Entsprechend führten die hohen Temperaturen und Strahlungsbelastungen bei den Hainbuchen teilweise zu irreversiblen Blattschäden. Auch die Silberlinden überschritten nur punktuell die 40°C, während die Winterlinden Blatttemperaturen von über 44°C erreichten.

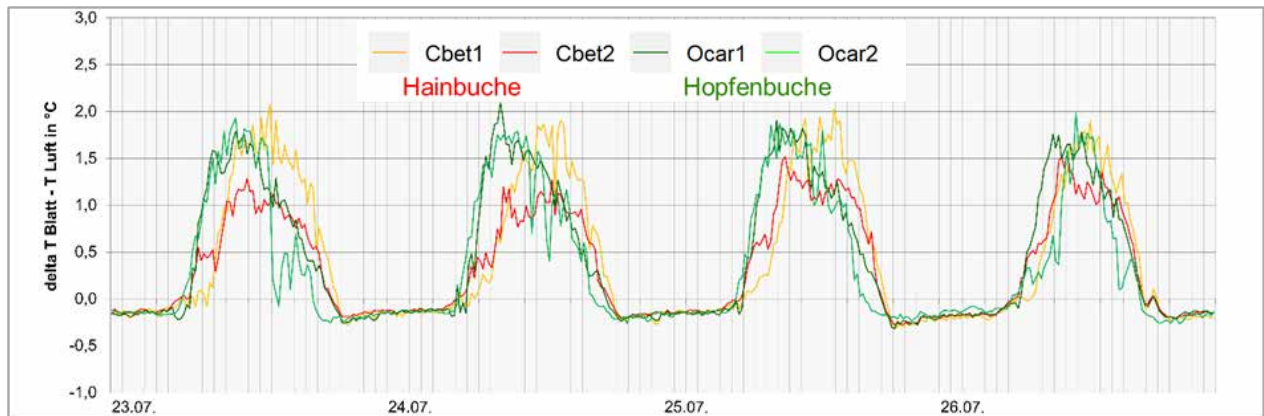


Abbildung 7: Differenz zwischen Blatt- und Lufttemperatur der Hain- und Hopfenbuchen: 23.7. bis 28.7.2019.

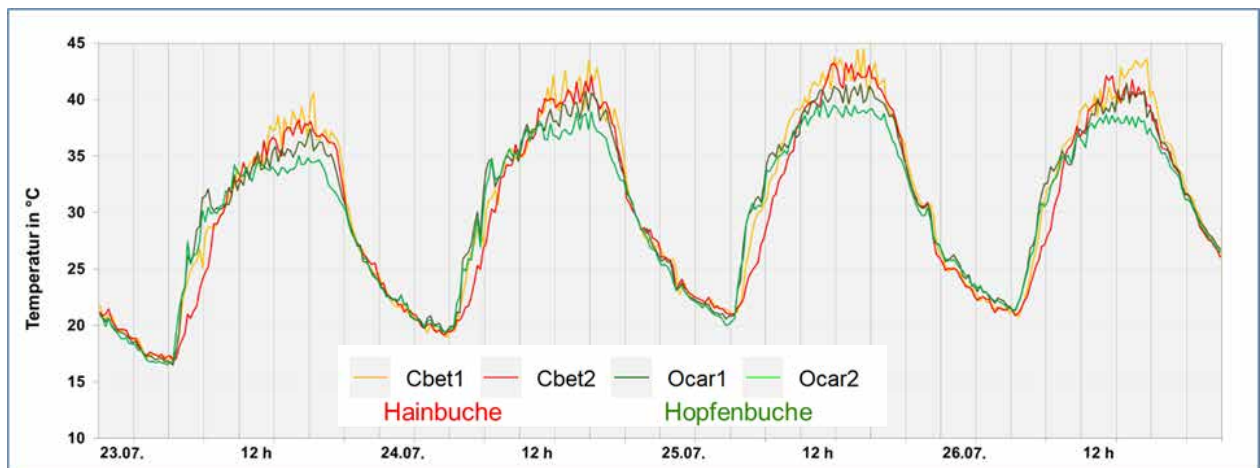


Abbildung 8: Blatttemperaturverlauf Hainbuchen vs. Hopfenbuchen: 23.7. bis 26.7.2019.

2020 verhielten sich die Versuchsbaumarten während ausgeprägter Hitzephasen im August analog zu 2019.

Während Hopfenbuchen ihren Wasserverbrauch über einen frühzeitigen Stomatenschluß und eine hohe Wassernutzungseffizienz regulieren (STRATOPOULOS et al. 2018a), verfolgen Silberlinden eine gänzlich andere Strategie, indem sie die Unterseite ihrer Blätter in der sonnenexponierten Oberkrone zur Sonne drehen. Die dichte silbrige Behaarung der Blattunterseite führt zu einer hohen Reflektion der Strahlung und damit Temperaturminderung der Blätter (WUNDSAM & HENNINGER 2012; Bild 3), während die tief in dem Haarfilz eingesenkten Stomata eine verringerte Verdunstung gewährleisten.



Bild 3: Helle Blattunterseiten der Silberlinde in der Oberkrone.

Fazit für die Praxis: Südosteuropäische Baumarten sind dank ihrer Herkunft an Hitze und Trockenheit besser angepasst als heimische Baumarten. Sie können ihre Blatttemperaturen während anhaltender Hitzeperioden so kontrollieren, dass sie diese vital überstehen, um nach Beendigung der Hitzewellen in Extremsommern die Assimilationsverluste durch eine verlängerte Vegetationsperiode auszugleichen und anders als gängige Stadtbaumarten mit entsprechenden Reserven in die nächste Vegetationsperiode zu starten.

Literatur

- BÖLL, S. 2017: 7 Jahre „Stadtgrün 2021“ – Einfluss des regionalen Klimas auf das Baumwachstum an drei bayerischen Standorten. Jahrbuch der Baumpflege 2017: 91-114.
- CHOAT, B., BRODRIBB, T. J., BRODERSEN, C. R., DUURSMAN, R. A., LÓPEZ, R., MEDLYN, L. 2018: Triggers of tree mortality under drought. *Nature* 558: 531-539.
- GILLNER, S., KORN, S., HOFMANN, M., ROLOFF, A. 2016: Contrasting strategies for tree species to cope with heat and dry conditions at urban sites. *Urban Ecosyst* DOI 10.1007/s11252-016-0636-z.
- KLEIN, T. 2014: The variability of stomatal sensitivity to leaf water potential across tree species indicates a continuum between isohydric and anisohydric behaviors. *Funct. Ecol.* 28: 1313-1320.
- ROLOFF, A. 2013: Bäume in der Stadt, Ulmer Verlag.
- Roloff, A., Bärtels, A. 2014: Flora der Gehölze. 4. Auflage. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- ROLOFF, A. 2021: Trockenstress bei Bäumen. Quelle & Meyer Verlag, Wiebelsheim.
- SCHÖNFELD, P., BÖLL, S. 2021: Forschungsprojekt „Stadtgrün 2021“ – Synthese. Tagungsband 17. Symposium zur Pflanzenverwendung in der Stadt „Stadtbaumarten im Klimawandel“, S.37-58.
- SJÖMAN, H., HIRONS, A. D., BASSUK, N. L. 2018: Improving confidence in tree species selection for challenging urban sites: a role for leaf turgor loss. *Urban Ecosystems*, <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0791-5>.

STRATOPOULOS, L. M. F., DUTHWEILER, S., HÄBERELE, K.-H., PAULEIT, S. 2018a: Effect of native habitat on the cooling ability of six nursery-grown tree species and cultivars for future roadside plantings. Urban Forestry & Urban Greening 30: 37-45.

STRATOPOULOS, L. M. F., ZHANG, C., DUTHWEILER, S., HÄBERELE, K.-H., RÖTZER, T., XU, C., PAULEIT, S. 2018b: Tree species from two contrasting habitats for use in harsh urban environments respond differently to extreme drought. International Journal of Biometeorology 63: 197-208.

WALTER, H. 1984: Vegetation und Klimazonen. Ulmer Verlag.

WUNDSAM, T., HENNINGER, S. 2016: Tilia tomentosa – der ideale „Stadtklimabaum“? Meteorologentagung DACH 2016, <https://meetingorganizer.copernicus.org/DACH2016-75>

Dr. Susanne Böll
LWG Veitshöchheim

Bildnachweis: © LWG Veitshöchheim

IMPRESSUM

Herausgeber:

Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG)

An der Steige 15, 97209 Veitshöchheim

Telefon +49 931 9801-0, Fax +49 931 9801-3100, www.lwg.bayern.de

Redaktion & Gestaltung:

Institut für Stadtgrün und Landschaftsbau (ISL), isl@lwg.bayern.de

© LWG, Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers.