

Das CO₂-Senkenpotential urbaner Gehölze im Kontext postwendzeitlicher Schrumpfungprozesse

Die Waldstadt-Silberhöhe (Halle/Saale) und deren Beitrag zu einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung

SARA VOLLRODT¹, MANFRED FRÜHAUF¹, DAGMAR HAASE^{2,3} UND MICHAEL STROHBACH^{3,4}

¹MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG INSTITUT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND GEOGRAPHIE VON-SECKENDORFF-PLATZ 4 06099 HALLE (SAALE)

²HUMBOLDT UNIVERSITÄT BERLIN DEPARTMENT OF GEOGRAPHY UNTER DEN LINDEN 6 10099 BERLIN

³HELMHOLTZ CENTRE FOR ENVIRONMENTAL RESEARCH - UFZ DEPARTMENT OF COMPUTATIONAL LANDSCAPE ECOLOGY PERMOSERSTRASSE 15 04218 LEIPZIG

⁴UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS – AMHERST DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION HOLDSWORTH HALL AMHERST, MA 01003

Schlüsselworte: Klimawandel, klimawandelgerechte Stadtentwicklung, shrinking city, Stadtbäume, CO₂-Speicherpotential

Keywords: climate change, shrinking city, CO₂- storage potential

Zusammenfassung

Von den urban geprägten Räumen der Erde, die ca.3% der Festlandoberfläche einnehmen, werden nahezu 80% der anthropogen bedingten CO₂-Emissionen emittiert. Damit kommt dem Ökosystem Stadt im Kontext der Diskussion um Quellen, aber auch Senken von Treibhausgasen und unter dem Blickwinkel von *Mitigation* und *Adaptation* eine Rolle als „Gestalter“ bezüglich der Ursachen und Folgen des Klimawandels zu. Integrierte Klimaschutzkonzepte auf kommunaler Ebene fokussieren diesbezüglich vorrangig die Minderung der jährlichen CO₂-Emission. Die natürliche Speicherleistung der urbanen CO₂-Senken Boden und Stadtvegetation findet bisher in der Forschung kaum, weniger noch in der (Planungs-) Praxis genügend Beachtung. Für die Erweiterung des Forschungsstandes und einer Ableitung von Empfehlungen für eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung untersucht die vorliegende Studie die CO₂-Speicherwirkung des integrierten Stadtentwicklungskonzeptes „Waldstadt-Silberhöhe“ in Halle (Saale) - genauer: der forstlichen Renaturierung zahlreicher Abrissflächen. Basierend auf der allometrischen Regression zwischen den Baumgrößen „Durchmesser“ und „oberirdische Holzbiomasse“ wurde aus forstwirtschaftlichen Studien eine Speicherleistung des aktuellen Baumbestandes in der „Waldstadt-Silberhöhe“ von 4.866 t CO₂ ermittelt. Bis zum Jahr 2025 werden die Stadtbäume, aufgrund des artspezifischen sekundären Dickenwachstums, insgesamt 14.150 t CO₂ absorbieren. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass in schrumpfenden Städten der Anteil an Grünflächen infolge einer Renaturierung der Abrissflächen steigt und so eine zunehmende Senkenwirkung schafft. Um dieses Potential bei künftigen Pflanzmaßnahmen für eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung optimal auszuschöpfen wurden Szenarien mit den Optimierungsfaktoren Bestandsdichte und Auswahl der Baumarten nach Rohdichte und Wachstumsverhalten modelliert. Aus deren Vergleich lassen sich verschiedene Handlungsempfehlungen ableiten, die weitergehende Positivwirkungen für andere Ecosystem-Serviceleistungen nach sich ziehen.

Abstract

The global urban landscape takes about 3% of the continental surface and emits almost 80% of anthropogenic CO₂ emissions. Therefore the ecosystem „City“ plays a role as „creator“ in the discussion about sources and sinks of greenhouse gases and also from the perspective of mitigation and adaptation regarding the courses and consequences of the climate change. On the municipal level concepts for climate protection focus particularly the reduction of the annually emission of CO₂. Until now the natural storage capacity of the urban CO₂ sinks „soil“ and „vegetation“ is considered hardly in the science and however less in the (planning) practice. To extend the state of research and to educe some recommendations for a climate-compatible urban development this study analyses the CO₂ storage effect of the integrated concept for climate protection from the „Waldstadt-Silberhöhe“ in Halle (Saale), Saxony Anhalt, Germany - more precisely: the afforestation numerous demolition sites. Based on the allometric regression between „diameter at breast high“ and „above-ground woody biomass“, a storage capacity about 4,866 Mg CO₂ of the current tree population in the „Waldstadt-Silberhöhe“ was determined with biomass equations from different forestry studies. By 2025, the CO₂ absorption will increase about 14,150 Mg CO₂ due to the secondary growth of the trees. In this context it is important that the share of planted areas in shrinking cities will rise because of the demolition of vacancies. This promises an increasing CO₂ storage. To optimize this potential during future tree plantations three scenarios were modeled. They differ in the parameters „tree density“ as well as the tree characteristics „bulk density“ and „growth rate“. From their comparison can be derived different recommendations for implementation and these entail advanced positive effects for other ecosystem services.

1. Einleitung

Städte und Stadtregionen spielen als „Verursacher“ und „Opfer“ eine Schlüsselrolle im Klimawandel (Churkina 2008: 107). Auf globaler Ebene betrachtet entstammen über 80% der Emissionen des wichtigsten Treibhausgases (THG) Kohlenstoffdioxid aus 2,4% der Landmasse - dem „urbanen Ökosystem“ (Oßenbrügge et al. 2010: 97). Aufgrund der räumlichen Konzentration der Vulnerabilität gegenüber den klimatischen Veränderungen gilt der urbane Raum jedoch auch als besonders betroffenes Gebiet (Mkulnv 2011). Die Erwärmung verstärkt den stadteigenen Wärmeinseleffekt und mindert den thermischen Komfort. Die Hochwasserhäufigkeit steigt und die Luftqualität sinkt durch die zunehmende Konzentration toxischer Stoffe - um nur einige Wirkfolgen des Klimawandels anzusprechen, die die Notwendigkeit einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung verdeutlichen (BMVBS/ BBSR 2009b: 20 f).

Die Regionalmodelle für Deutschland prognostizieren eine Erwärmung um 0,5 bis 1,5°C im Zeitraum zwischen 2021 bis 2050 (IPCC 2007). Diese Prognose geht einher mit einer Veränderung der Niederschlagsverteilung und der Tendenz hin zu häufigeren und längeren sommerlichen Trockenphasen sowie dem verstärkten Auftreten von Extremereignissen (Böhler et al. 2008: 11-12). Zur Minderung der prognostizierten Folgen eines Temperaturanstiegs von mehr als 2°C ist die Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf < 450 ppm¹ unabdingbar (Vereinte Nationen 1997). Dafür liegen die Ziele der nationalen Klimaschutzstrategien nicht allein in der Vermeidung von Emissionen sondern auch in der Stärkung natürlicher Senken des Kohlenstoffkreislaufs (Kordowski 2009: 3).

Der urbane Raum bietet mit dem Steuerinstrument der Stadtentwicklung das Potential bereits vorhandene Senken im urbanen C-Kreislauf effizienter zu gestalten (BMVBS/ BBSR 2009a: 6 nach: World Bank 2008). Die ExWoSt-Studie² der „klimawandelgerechten Stadtentwicklung“ empfiehlt u.a. die Stadtvegetation als eine wichtige Option der Anpassung (BMVBS/ BBSR 2009b). Dafür sprechen zum einen ihre ökosystemaren Dienstleistungen der Klimaregulation sowie die Verbesserung der Lufthygiene (Bruse 2003). Die wichtigste Dienstleistung für diese Untersuchung liefert die Stadtvegetation mit ihrer CO₂-Senkenwirkung, denn in dem urbanen C-Kreislauf stellen

die Stadtbäume, neben dem Boden, die wichtigste CO₂-Senke dar (Oßenbrügge 2010: 11). Ihre Biomasseproduktion und Lebensdauer liegt deutlich über denen der Sträucher und der annualen Vegetation (Kordowski 2009: 13).

Mit der Wiedervereinigung Deutschlands begann die, für ostdeutsche Agglomerationsräume, typische Bevölkerungsentwicklung der „*shrinking city*“ (Friedrichs et al. 2001). Diese Auswanderungswellen in die alten Bundesländer hinterließen einen enormen Wohnungsleerstand, der u.a. von dem Bund-Länder-Programm „*Stadtumbau Ost*“ (vgl. BMVBS / BBR 2006) nach und nach abgebaut wurde und wird. Aus den vom Staat finanzierten Abrissmaßnahmen resultiert bis heute eine stetig zunehmende Verfügbarkeit an Freiflächen. Unter dem Leitbild einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung unterstützt das neue Freiraumpotential die nationalen Reduktionsziele³. So kann der kommunale Beitrag zum Klimaschutz sowie die Anpassung an die unumgänglichen Folgen des anthropogenen Klimawandels effizienter gestaltet werden (Böhler et al. 2008: 11).

1.1 Fragestellung und Zielsetzung

Die ehemalige Großwohnsiedlung Silberhöhe am südlichen Stadtrand Halles verlor nach der Wiedervereinigung Deutschlands etwa 66% seiner Einwohner (StALA 2011). Nach dem Abriss der leer stehenden Wohneinheiten begann im Jahr 2004 die Realisierung des integrierten Stadtentwicklungskonzeptes (ISEK) für den Stadtteil Silberhöhe mit dem Leitbild einer „Waldstadt“. Die bis 2010 erfolgreich umgesetzte Renaturierung der entstandenen Freiflächen in Form von Baumpflanzungen (vgl. Stadt Halle 2007) bietet ein optimales Beispiel für die Analyse der symbiotischen Strategie des Stadtumbaus mit Klimaschutzmaßnahmen.

Die Fragestellung dieser Arbeit liegt in dem CO₂-Speicherpotential der Waldstadt-Silberhöhe als Beitrag zu einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung. Ihre Wirkung als CO₂-Senke im urbanen Kohlenstoffkreislauf wird im Kontext dieser Arbeit insbesondere unter dem Aspekt des Zuwachses der oberirdischen Holzbiomasse aus den bisher erfolgten Pflanzungen

¹ Die atmosphärische CO₂-Konzentration liegt etwa bei 383 ppm (Kordowski 2009; Stand 2008) und steigt jährlich (zwischen 1960 und 2005) im Mittel um 1,9 ppm (IPCC 2007: 2).

² Forschungsprogramm Experimenteller Wohnungs- und Städtebau des BMVBS

³(vgl. ARGEBAU 2008: 6: bis 2020 Reduzierung der THG-Emissionen um 40%)

beurteilt. Die Zielstellungen wurden mit den folgenden Handlungsschritten analysiert:

- Anwendung von Schätzverfahren zur Bestimmung der oberirdischen Holzbiomasse im Untersuchungsgebiet,
- CO₂-Speicherwirkung des aktuellen Baumbestands in der Waldstadt-Silberhöhe,
- Prognose der künftigen CO₂-Speicherung mithilfe der jährlichen Zuwachsrates der oberirdischen Holzbiomasse,
- vergleichende Analyse verschiedener Pflanzalternativen hinsichtlich Bestandsdichte und Artenwahl zur Optimierung künftiger Aufforstungsmaßnahmen bis zum Planungshorizont 2025,
- Bewertung des Stadtentwicklungskonzepts „Waldstadt-Silberhöhe“ als klimawandelgerechte Stadtentwicklung.

2. Grundlagen

In Tab. 1 sind die bisher vorrangig thematisierten schleichenden Veränderungen des Klimawandels im Stadtraum ersichtlich. Die dargelegten Punkte betonen die Dringlichkeit der Inanspruchnahme urbaner Leistungspotentiale zur Begegnung des Klimawandels.

Einige Wirkfolgen des Klimawandels auf den urbanen Raum, wie Hitzebelastung oder Hochwasserereignisse, sind offensichtlich. Sie sind jedoch verknüpft mit Effekten, die sich erst auf den zweiten Blick definieren lassen (z.B. für Transport und Verkehr). Aus der Literaturschau und Expertenbefragung des BMVBS/ BBSR wurde daher die oben abgebildete Liste mit den wichtigsten Wirkfolgen zusammengefasst (ebd. 2009b: 19). Sie gilt als Grundlage für die Identifizierung von Faktoren, die die klimatischen Veränderungen im urbanen Raum beeinflussen (ebd. 2009b: 6).

2.1 Definition einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung

Der Klimawandel und dessen Folgen stellen die Stadtentwicklung als Steuerinstrument des urbanen CO₂-Kreislaufs vor eine neue Herausforderung. Nach den Grundsätzen der Raumordnung ist mit § 2 Abs. 2 Nr. 6 Satz 7 ROG „den räumlichen Erfordernissen des Klimaschutzes [...] Rechnung zu tragen, sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen [...]“ (BMVBS/BBR 2008). Im Sinne dessen sollten räumliche Möglichkeiten für den

Ausbau regenerativer Energien, für eine effiziente Energienutzung und den Erhalt sowie die Entwicklung natürlicher Senken für klimaschädliche Stoffe geschaffen werden (ebd.). Ein solch mono-funktionales Leitbild muss unter Umständen Maßnahmen für den Klimaschutz und Lösungen zur Minderung der Vulnerabilität gegenüber den Klimafolgen *gegeneinander* abwägen (BMVBS /BBSR 2009a: 49). So kann z.B. die (ebenerdige) Nutzung von Solaranlagen mit dem Kühlungseffekt der Vegetation zur Minderung der Hitzevulnerabilität konkurrieren. Das Leitbild „klimawandelgerecht“ bedarf also einer 3-gleisigen Planungsstrategie: Maßnahmen zum Klimaschutz und -anpassung müssen zusammen mit den stadtentwicklungspolitisch relevanten Aufgaben, wie dem demographischen Wandel, dem Flächenmanagement, einer sozialräumlichen Segregation oder der Globalisierung synergetisch geplant werden (BMVBS / BBSR 2010: 46). Prognosen über künftige Bevölkerungs- und Beschäftigungsentwicklungen finden bisher jedoch in kaum einem Klimaschutzkonzept Beachtung und die Zielkonkurrenzen zwischen eben diesen Handlungsfeldern werden selten thematisiert (BMVBS / BBSR 2010: 46). Solche Konflikte aber auch Synergien sind im Rahmen der städtischen Zieldiskussion und Abwägung zu identifizieren und aufzulösen (ebd.). In der DAS-Studie (Deutscher Anpassung an den Klimawandel) findet das Leistungspotential einer nachhaltigen Stadtentwicklung eine deutliche Bestätigung: *„Räumliche Planung kann mit den bereits bestehenden rechtlichen und planerischen Instrumenten sowohl Klimaschutz als auch Anpassung unterstützen. [...] Die Raumplanung kann mit der Entwicklung von Leitbildern für anpassungsfähige und belastbare Raumstrukturen eine Vorreiterrolle übernehmen, die gegenüber den Auswirkungen aller gesellschaftlichen Veränderungsprozesse auf die Raumstruktur robust und flexibel reagiert“* (BMU 2008: 42). Elementar ist also die planerische Festlegung eines Klimaschutzkonzeptes. Aus einer jährlichen CO₂-Bilanz und einem regelmäßigen Monitoring können Ziele definiert und Handlungsfeld übergreifende Strategien entwickelt werden. Viele Kommunen sind gegenwärtig jedoch aufgrund ihrer Haushaltslage häufig nicht in der Lage, den hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand für die Erstellung nötiger Klimaschutzkonzepte bereit zu stellen (BMVBS /BBSR 2010: 46).

2.2 Forschungsstand des CO₂-Speicherpotentials urbaner Wälder

Eine besondere Quantifizierung der Funktion eines Waldes als CO₂-Senke demonstrieren die Bundeswaldwaldinventuren (BMELV 2002). In der Forstwissenschaft ist die Inventarisierung des Baumbestandes für eine biometrische Berechnung

Tabelle 1. Mögliche Wirkfolgen des Klimawandels auf den urbanen Raum in Deutschland (BMVBS/ BBSR 2009b: 20)

Wirkungsbereiche	Wirkfolgen des Klimawandels
Menschliche Gesundheit	sinkender thermischer Komfort Hitze und Kälte bedingte Todesfälle Extremereignisse
Energie	steigender Energiebedarf für Kühlung und zur Aufbereitung von Wasser sinkender Heizbedarf etc.
Wasserhaushalt	veränderte Häufigkeit und Höhe von Hochwässern steigender Wasserbedarf im Sommer sinkendes Brauchwasserangebot im Sommer etc.
Freiräume und Grünflächen	steigender Bedarf an Kaltluftentstehungsgebieten und Erholungsflächen Veränderung des Pflegebedarfes (besonders Bewässerung) Veränderung der Eignung von Pflanzen (z.B. Straßenbäume) Veränderung der Biodiversität
Technische und soziale Infrastruktur	veränderte Ansprüche an technische (z.B. Entwässerung) und soziale Infrastruktur (Klimatisierung öffentlicher Einrichtungen) vermehrte Schäden Extremereignissen etc.
Lufthygiene	zunehmende Konzentration toxischer Stoffe (z.B. Ozon, Stäube) steigende Geruchsbelastungen
Transport und Verkehr	vermehrte Behinderungen und Verspätungen durch Extremereignisse steigende Kosten für die Instandhaltung
Tourismus und Kulturerbe	Auswirkungen auf das Stadtimage Veränderung der Badegewässerqualität (z.B. durch Algenblüten)

der Kohlenstoffbilanz ein etabliertes Verfahren (siehe Kändler et al. 2009, Fischlin et al. 2003). Eine umfassende Quantifizierung der Kohlenstoffbindung des Stadtgrüns fand in Deutschland bisher neben einer Studie in Leipzig (Strohbach & Haase 2012) kaum Anwendung. Der aktuelle Wissenstand des CO₂-Speicherpotentials städtischer Gehölze geht auf verschiedene Studien amerikanischer Forscher seit Beginn der 1990er Jahre zurück (siehe u.a. Rowntree et al. 1991, Nowak 1994, Nowak et al. 2002a McPherson 1998 oder McPherson et al. 2005). Die Schätzungen basieren bei allen Projekten auf der allometrischen Regression zwischen verschiedenen Baumkompartimenten, wie der Höhe, dem Durchmesser oder dem Kronenvolumen (vgl. Whittaker 1968). Aus dem Vergleich der genannten Studien lassen sich die Parameter *Bestandsdichte und Durchmesserverteilung* als wichtigste Einflussgrößen auf den Kohlenstoffvorrat je Flächeneinheit ableiten (vgl. McPherson 1998). Nowak (2002b) betont insbesondere den Einfluss der Baumart. Bei der Beachtung artspezifischer Charakteristika wie Lebensdauer, Wachstumsverhalten und Holzdichte kann die Artenwahl das CO₂-Speicherpotential positiv beeinflussen (ebd.). Die Literatur stellt zudem umfassende Sammlungen

standortspezifischer Biomassegleichungen bereit. All diese Gleichungen wurden in Forstbeständen erstellt. Der Forschungsstand explizit an Stadtbäumen entwickelter Formeln steht dagegen noch am Anfang und birgt einige Unsicherheiten (McHale et al. 2009). Für die Schätzung der Holzbiomasse von Stadtbäumen in Deutschland wurden die Pilotprojekte von Strohbach & Haase (2012), Strohbach et al. (2011, 2012) und Frenzel (2009) als Referenzstudien für die vorliegende Untersuchung herangezogen. In Frenzel (2009) wurde das Leipziger Straßenbaumkataster als Datengrundlage für die oberirdische Holzbiomasse und deren C-Speichervermögen im Leipziger Stadtraum herangezogen. Das Kataster ermöglicht des Weiteren eine Alters- und Wachstumsklassifizierung anhand der Artenverteilung und deren spezifisch-physiologischen Wachstumseigenschaften. Aus stichprobenartigen Messungen und deren Vergleich mit den Bestandsdaten resultiert der jährliche Durchmesserzuwachs. Während der Kohlenstoffgehalt eines Baumes durch die Messung des Durchmessers in Brusthöhe (1,30 m; im folgenden BHD) direkt ermittelt wird, stammen die jährlichen Wachstumsraten zumeist aus forstlichen Ertragstafeln. Das jährliche Wachstum ist jedoch nicht nur artspezifisch,

sondern in besonderem Maße auch standortbeeinflusst. In Anbetracht der räumlichen Nähe und der Aufnahme unter urbanen Standortbedingungen fanden die Wachstumsraten der Leipziger Straßenbäume für diese Untersuchung besondere Beachtung.

3. Das Untersuchungsgebiet

Die Großwohnsiedlung Silberhöhe am südlichen Stadtrand Halles wurde zwischen 1979 und 1989 auf einem Plateau über der Elster-Saale-Aue erbaut. Diese etwa 213 ha große Fläche bot mit ursprünglich etwa 15.000 Wohneinheiten Wohnraum für ca. 39.000 Menschen in der Nähe ihrer Arbeitsstätte, den Chemiekombinaten Leuna und Buna (Stadt Halle 2011: 113). Das Potential für eine Förderung der urbanen CO₂-Senkenwirkung schaffte der postwendezeitliche Prozess der Stadtschrumpfung.

Die postwendezeitlichen Transformationsprozesse bewirkten einen intensiven ökonomischen und demographischen Wandel. Halle stellt zwar mit 236.402 Einwohnern (Stand 31.12.2010) noch immer die bevölkerungsreichste Stadt in Sachsen Anhalt dar (Stadt Halle 2011: 6). Sie verlor jedoch seit 1990 etwa 25% ihrer Einwohner (ebd.). Halle-Silberhöhe traf es mit einem Einwohnerverlust von 66% zwischen 1994

und 2010 besonders (ebd.:113). Dem folglich hohen und dauerhaften Anstieg des Leerstandes wurde bis 2009 mit einem Abrissvolumen von insgesamt 40% der ursprünglichen Wohneinheiten begegnet (Neubert 2009: 2). Diese Maßnahme stellt die Grundlage für die Entwicklung des Leitbildes „Waldstadt-Silberhöhe“ mit Hilfe des Integrierten Stadtentwicklungskonzepts (ISEK) im Jahr 2004 dar. Aus der gesamtstädtischen Entwicklungsperspektive gilt es, die Qualitäten eines Stadtteils zu bewahren und zu fördern (Stadt Halle 2007: 83). Neben der noch immer guten sozialen Infrastruktur und Verkehrsanbindung implizieren die Freiflächen und die Nähe zur Saale-Elster-Aue ein zunehmend bedeutendes Qualitätsmerkmal für die Silberhöhe. Durch die Entdichtung der Bausubstanz und die Aufforstung der Freiflächen steigt die Wohnqualität und verbesserte damit die Wettbewerbsfähigkeit und den ökonomischen Wert des Wohnraums (ebd.).

Das Leitbild der „Waldstadt“ impliziert eine qualitative und quantitative Verbesserung der ursprünglich eher spärlichen Gestaltung der Grünflächen (ebd.). Diese reicht von einem parkartigen Stadtwald im

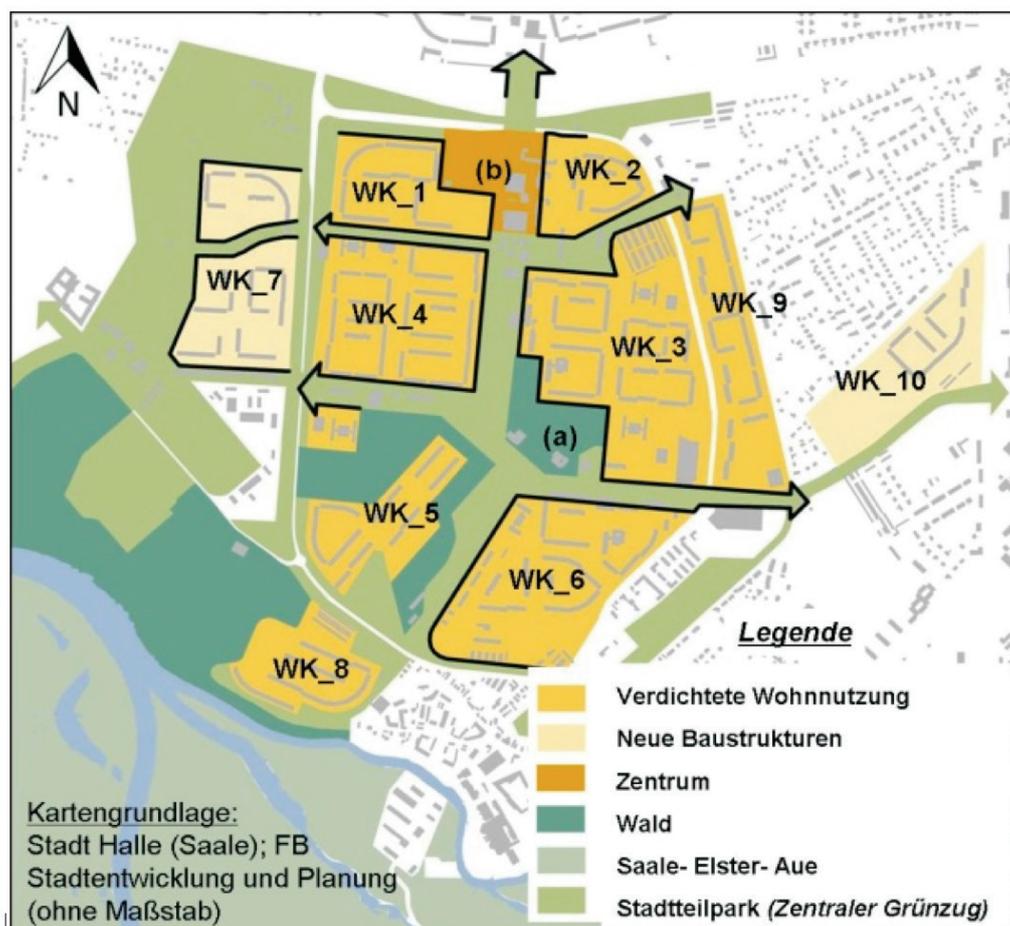


Abb. 1 Leitbild der „Waldstadt-Silberhöhe“ (verändert nach Stadt Halle 2007: 87)

zentralen Grünzug hin zu naturnahen Aufforstungs- und Sukzessionsflächen (Stadt Halle 2007: 75)

Die Handlungsfelder im Stadtumbaugebiet gliedern sich auf in Erhaltungsbereiche als Rahmen der künftigen Quartiersbildung, Umstrukturierungsbereiche und Vorbehaltsflächen. Auf den Umstrukturierungsbereichen ist der Rückbau bereits erfolgt oder geplant. Die Möglichkeiten der Nachnutzung stehen für diese Areale also fest (Stadt Halle 2007: 82-84). Die zunächst bis zum Jahr 2010 geplanten Abriss- und Aufforstungsmaßnahmen wurden erfolgreich abgeschlossen. Insgesamt erfolgte bisher die Pflanzung von 8.265 Bäumen (Neubert 2009).

4. Methodik

Im Verlauf ihres jährlichen Wachstums nehmen Bäume das Treibhausgas CO₂ während der Fotosynthese auf. Einen Teil davon speichern sie längerfristig in ihrem Holzgewebe (Nowak et al. 1998: 716). Die chemische Zusammensetzung des Holzes (siehe Tab. 2) zeigt, dass ein Gramm der organischen Trockensubstanz zu etwa 50% aus Kohlenstoff besteht (Larcher 2001: 13). Aufgrund dessen wird in der vorliegenden Untersuchung ausschließlich die oberirdische Holzbiomasse (70% der Phytomasse mit Stumpf, Stamm, Geäst und Rinde) als CO₂-Senke analysiert.

$$1 \text{ g}_{\text{org. Trockensubstanz}} = 0,42-0,51 \text{ g C} = 1,5-1,7 \text{ g CO}_2$$

$$(\text{Massenumrechnungsfaktor } 1 \text{ g C} = 3,67 \text{ g CO}_2)$$

Die oberirdische Holzbiomasse eines Einzelbaumes wird durch Schätzfunktionen bestimmt. Der Schlüssel für diese Kalkulation liegt in deren allometrischen Regression zu den Pflanzengrößen Durchmesser (BHD) und/oder der Baumhöhe (Whittaker et al. 1968: 23). In dieser Untersuchung wurde die im Gelände einfach kartierbare dendrometrische Größe des BHD für die Schätzung der oberirdischen Holzbiomasse verwendet. Beschrieben wird die allometrische Funktion häufig mit der Gleichung (Braeker 2008b):

$$y = a \times x^b$$

y = oberirdische Holzbiomasse (oHB); x = BHD; a und b = Schätzungsparameter

4.1 Auswahl der Formeln

Die literaturbasierten Gleichungen für die Schätzung der Holzbiomasse im Untersuchungsgebiet stammen ausnahmslos aus forstwirtschaftlichen Studien. Zunächst wurden artspezifische Gleichungen ausgewählt. Für viele Arten stellt die Literatur mehr als eine Formel zur Verfügung. Als zusätzliche Kriterien für die Auswahl wurden daher ähnliche Wuchsgebiete sowie eine ausreichend große BHD-Spannbreite berücksichtigt. Steht keine artspezifische Formel zur Verfügung bietet die Anwendung gattungsspezifischer Gleichungen eine geeignete Ausweichoption (siehe Nowak et al. 2002a).

Eine bedeutende Alternative stellt die Generierung so genannter *Mischformeln* bzw. dar. Die besonders von Pastor et al. (1983) publizierte Methodik bietet sich vor allem bei der überregionalen Anwendung standortspezifischer Gleichungen an. Für die Entwicklung dieser generalisierten Gleichungen stellt die Literatur eine umfassende Datensammlung standortspezifischer Biomassegleichungen bereit. Zianis et al. (2005) schafft einen Überblick über 607 Biomasse- und 230 Volumengleichungen für 39 Baumarten in Europa. Für Nordamerika sind Ter-Mikaelian et al. (1997) oder Jenkins et al. (2003) zu nennen. Jenkins et al. (2003) nutzen ihre Sammlung bspw. zur Schätzung der nationalen C-Speicherwirkung des nordamerikanischen Waldbestandes.

Die Standortbedingungen im Stadtraum unterscheiden sich signifikant von der natürlichen Lebenssituation eines Waldbaumes. Um die damit verbundene Ungenauigkeit der Schätzungen zu mindern wurden daher vorrangig generalisierte Gleichungen ausgewählt.

Die folgende Tab. 3 zeigt die Formeln zur Schätzung der oberirdischen Holzbiomasse im Untersuchungsgebiet.

Tabelle 2. Chemische Grundelemente von trockenem Holz (Frommhold 2008: 36)

Chemische Grundelemente	Anteil
Kohlenstoff	ca. 50 %
Sauerstoff	ca. 43%
Wasserstoff	ca. 6%
Stickstoff	< 1%
Mineralstoffe	< 1%

Tabelle 3. Formeln zur Berechnung der oberirdischen Holzbiomasse (Vollrodt 2011: 39)

ID	Formel	Quelle
1	$BM = Exp(a + b \times \ln(BHD))$	Pastor et al. 1986/ Jenkins et al. 2003
2	$BM = a \times (BHD)^2$	Clark et al. 1986
3	$BM = a \times BHD^2$	Muukkonen 2007
4	$BM = EXP(a + b \times (\ln(BHD) \times \pi))$	BUNCE 1968

Die dazugehörigen Gleichungen mit den artspezifischen Parametern finden sich in Vollrodt 2011 (:38).

4.2 Datengrundlagen

Ein regelmäßiges Monitoring und eine entsprechend lückenlose Datensammlung des aktuellen Baumbestandes für den Stadtteil Halle-Silberhöhe existiert nicht. Für eine möglichst genaue Schätzung der gesamten oberirdischen Holzbiomasse erfolgte die Gehölzinventur daher über das statistische Verfahren der zufälligen Stichprobenwahl (random sampling; siehe Strohbach & Haase 2012). Die Überlegungen für einen Stichprobenumfang mit einer ausreichenden Schätzgenauigkeit berücksichtigen die Anzahl der Stichproben und deren Größe. Zur Schätzung des Gesamtbestandes wurden im August 2010 die Einzelbäume innerhalb von 60 Plots mit je 15m Radius (= 0,067 ha) kartiert. Als Kartengrundlage liegt ein Digitales Orthofoto des Untersuchungsgebietes mit einer Auflösung von 20 x 20 cm vor (LVermGeo 2008). Während den Kartierarbeiten wurden die Baumartenverteilung sowie der BHD des Einzelbaums (mindestens 2,5 cm) erfasst. Die Schätzung der oberirdischen Holzbiomasse erfolgt mit den artspezifisch ausgewählten allometrischen Regressionsgleichungen. Die plotskalierten Ergebnisse werden gemittelt, auf einen Hektar hochgerechnet und schließlich auf die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes von 213 ha extrapoliert.

4.3 Analyse der Wachstumsraten

Das sekundäre Dickenwachstum eines Baumes impliziert das Maß der CO₂-Sequestrierung und damit ein jährlich zunehmendes CO₂-Speicherpotential. Die CO₂-Sequestrierung ist zum einen art- bzw. gattungsspezifisch und abhängig vom Wachstumsverhalten und der Lebensdauer eines Baumes. Zum anderen beeinflussen die gegebenen Standortbedingungen den jährlichen Zuwachs an Holzbiomasse. Gehölze lassen sich grob differenzieren in schnell-wachsende Baumarten mit einer geringeren Lebensdauer und Baumarten mit einem

mittleren bis langsamen Wachstum sowie einem im Durchschnitt späteren Eintritt in die Reifephase (Braeker 2008a). Der jährliche Durchmesserzuwachs sinkt mit dem zunehmenden Alter eines Baumes. Bei der Ermittlung des künftigen Wachstums wird demnach die Altersstruktur des Gehölzbestandes berücksichtigt.

Das fehlende Monitoring im Untersuchungsgebiet verhinderte die Bildung artspezifischer und altersabhängiger Wachstumsraten. Aufgrund der Ähnlichkeit der (urbanen) Standortbedingungen fanden die Zuwachsraten aus der Studie von Frenzel (2009) alternativ ihre Anwendung.

4.4 Entwicklung von Pflanzalternativen

Das geplante Aufforstungskonzept bis 2010 wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Stadt Halle geht jedoch aufgrund der gegebenen Altersstruktur von einem anhaltenden Bevölkerungsrückgang aus. Daher „[...] wird es möglicherweise nach 2010 noch einmal zu einer grundsätzlichen Neuorientierung kommen“ (Stadt Halle 2007: 75). Die in dieser Arbeit modellierten Pflanzalternativen (siehe Abb. 1) orientieren sich an der Optimierung des künftigen CO₂-Speicherpotentials der Waldstadt-Silberhöhe. Der Zeitrahmen bis 2025 orientiert sich an der „Raumordnungsprognose 2025/2050“ für Deutschland (siehe BBSR 2009). Als Unterschied zwischen den Pflanzalternativen werden *Bestandsdichte* [BZ/ha] und das *Wachstumsverhalten* der Aufforstungen (schnelles vs. langsames Wachstum) als Einflussgrößen auf die jährliche CO₂-Sequestrierung analysiert.

Die Auswahlkriterien der Baumarten für die künftigen Pflanzungen fokussieren die Parameter:

Wachstumsgeschwindigkeit und Lebensdauer, artspezifische Rohdichte und Porenvolumen des Holzes

Eignung der Baumarten für das sich verändernde Klima.

Bei der Auswahl der Baumarten müssen ebenso die klimatischen, pedogenen und hydrologischen Standortbedingungen berücksichtigt werden. Deren Beachtung gewährleistet ein ungehindertes und gesundes Wachstum der Bäume. Besonders die Stresssituationen Sommerhitze und Trockenheit verstärken sich in Zukunft infolge der klimatischen Veränderungen und stellen die Stadtvegetation vor neue Herausforderungen (Roloff et al. 2008: 2). Vor diesem Hintergrund gilt es bei der Artenwahl besonders wärmeliebende Baumarten mit einem geringen Wasserbedarf/ hoher Trockenheitsresistenz

zu beachten. Eine Entscheidungshilfe für die Stadtplanung stellt die Klima-Arten-Matrix (KLAM) von Roloff et al. (2008) in Abb. 3 dar.

Für die Verwendung als Stadtbaum in Mitteleuropa folgt die Eistufung der Arten nach Roloff et al. 2008 als sehr geeignet bis geeignet unter folgenden Kriterien:

- max. 500 mm Jahresniederschlag und möglicher Frost bis Anfang Mai mit einer ausreichenden Winterfrosthärte⁴

Die Kriterien orientieren sich an dem Mittel der klimatischen Verhältnisse in Ostdeutschland.

⁴ Tagesminimumtemperatur von -17,8°C bis -23,3°C



Pflanzalternative I: "Waldstadt"

- Stand 2010: 8.265 Bäume
- keine weitere Aufforstung bis 2025



Pflanzalternative II: "Urbaner Wald"

- jährliche Aufforstung bis 2025 mit einer Bestandsdichte von 203 Bäumen/ha
- Artenwahl: schnelles Wachstum
- Artenwahl: mittleres Wachstum
- Artenwahl: langsames Wachstum



Pflanzalternative III: "Regenerativer Waldpark"

- 1/3 urbaner Wald (BZ 203/ha)
- 1/3 Landschaftspark (BZ 76/ha)
- 1/3 Kurzumtriebsplantage

Abb. 2 Pflanzalternativen für das CO₂-Speicherpotential in der „Waldstadt-Silberhöhe“ 2025 (Vollrodt 2011: 32)

		Winterhärte			
		.1	.2	.3	.4
Trockenstresstoleranz	1.	1.1	1.2	1.3	1.4
	2.	2.1	2.2	2.3	2.4
	3.	3.1	3.2	3.3	3.4
	4.	4.1	4.2	4.3	4.4

Beschreibung	Benotung
sehr gut geeignet	1.1/ 1.2
gut geeignet	1.3/ 2.1/ 2.2
geeignet aber z.T. problematisch	2.3/ 3.1/ 3.2/ 3.3
nur sehr eingeschränkt geeignet	1.4/ 2.4/ 3.4/ 4.1/ 4.2/ 4.3
ungeeignet	4.4

Abb. 3 Klima-Arten-Matrix (KLAM) mit 16 Einstufungen nach Trockentoleranz und Winterhärte (modifiziert übernommen aus Roloff et al. 2008: 9)

Repräsentiert werden sie von der subkontinental geprägten Klimastation in Leipzig-Schkeuditz (ebd.).

5. Ergebnisse

5.1 CO₂-Senke Waldstadt Silberhöhe 2010

Die Gehölzinventur des Untersuchungsgebietes und das statistische Verfahren des bootstrapping liefern den Näherungswert der oberirdischen Holzbiomasse von 14,3 t/ha. Die Extrapolation des plot-basierten Mittelwertes ergibt für die insgesamt 213 ha große Waldstadt-Silberhöhe etwa 3.040 t. Umgerechnet stellt die oberirdische Holzbiomasse im Jahr 2010 demnach eine Senke für 4.866 t des klimawirksamen Treibhausgases CO₂ dar.

Die statistische Auswertung in Tab. 5 zeigt eine Standardabweichung von 2,35 t/ha. Der Standardfehler der untersuchten Flächen liegt bei 0,074 t/ha. Er gibt an, dass der Näherungswert für den Erwartungswert der Grundgesamtheit mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% (Konfidenzintervall) in dem engen Schwankungsbereich zwischen 14,2 und 14,3 t/ha liegt. Die geringfügige

Schwankung resultiert aus der Tatsache, dass der Standardfehler des Mittelwertes gerade das $\frac{1}{\sqrt{n}}$ -fache der Standardabweichung der Grundgesamtheit ausmacht (Bahrenberg et al. 1999: 113). Die Bildung des Mittelwertes schließt daher Extremwerte (22,5 t/ha) aus der Grundgesamtheit aus und mindert die Streuung.

5.2 Artspezifische Zuwachsraten und künftiges Speicherpotential bis 2025

Das Wachstum eines Baumes impliziert eine stetige Steigerung seines CO₂-Speicherkapitals. Dieser Beständigkeit steht die Variabilität des Zuwachses gegenüber, denn das Lebensalter sowie das artspezifische Wachstumsverhalten weisen im Vergleich signifikante Unterschiede. Die Auswertung der Kartierarbeiten zeigt die Hauptgattungen *Acer* (Ahorn), *Prunus* (Vogelkirsche), *Populus* (Pappel) und *Salix* (Weide). Sie machen etwa 50% des gesamten Bestandes aus. Weitere wichtige Gattungen stellen u.a. *Fraxinus* (Esche) und *Tilia* (Linde), *Sorbus* (Mehlbeere), *Robinia* (Robinie) und *Betula*

BM = Biomasse; a und b = Parameter; BHD = Brusthöhendurchmesser

Tabelle 4. CO₂-Speicherpotential der oberirdischen Holzbiomasse 2010 in der „Waldstadt-Silberhöhe“ (Vollrodt 2011: 42)

oberirdische Holzbiomasse pro Hektar 2010 [t]	oberirdische Holzbiomasse Waldstadt-Silberhöhe 2010 [t]	CO ₂ 2010 [t]
14,3	3.041	4.866

Tabelle 5. Statistische Auswertung der oberirdischen Holzbiomasse der „Waldstadt-Silberhöhe“ 2010 (eigene Berechnung mit SPSS_18 sowie eigene Darstellung 2011)

Mittelwerte der oberirdischen Holzbiomasse	Statistik	Standardfehler
Mittelwert der Mittelwerte	14,28	0,074
68% Konfidenzintervall des Mittelwertes	Untergrenze	14,21
	Obergrenze	14,36
5% getrimmtes Mittel	14,25	
Median	14,21	
Standardabweichung	2,35	
Minimum	8,50	
Maximum	22,5	
N = 1000 Fehlend = 0		

(Birke) dar. Diese Häufigkeitsverteilung lässt sich auf die vergangenen Aufforstungsmaßnahmen zurückführen.

Die Schätzung der künftigen oHB für die Waldstadt-Silberhöhe erfolgt über den jährlichen Durchmesserzuwachs. Der mangelhafte Datenbestand im Untersuchungsgebiet führte zu dem Entschluss die Wachstumsklassifizierung der Untersuchung im Leipziger Stadtraum zu übernehmen. Die jährliche Zuwachsrate *urbaner Gehölze* bieten aufgrund einer gewissen Standortähnlichkeit (Stadtklima, ab- und aufgetragener Oberboden etc.) eine höheres Potential an Genauigkeit

als Zuwachsraten aus forstlichen Ertragstafeln (vgl. Blume 1993). Tab. 6 zeigt die angewandten Werte. In Tab. 7 folgt eine Zuordnung der erfassten Baumarten in der Waldstadt-Silberhöhe zu den von Frenzel 2009 gruppierten Wachstumsklassen.

Das durchschnittliche altersspezifische Wachstum zeigt deutlich den Kulminationspunkt nach etwa 40 Jahren mit einer sprunghaften Abnahme des jährlichen Durchmesserzuwachses auf von 0,67 auf 0,49 cm. Die Wachstumsrate der langsam wachsenden Gattungen in der WK I bleibt über alle Altersklassen hinweg konstant (vgl.

Tabelle 6. Tab. 6: Altersspezifischer jährlicher Zuwachs des Brusthöhendurchmessers je Wachstumsklasse (Ergebnisse übernommen aus: Frenzel 2009: 31)

	Ø altersspezifischer Zuwachs [cm/a]	WK I Zuwachs [cm/a]	WK II Zuwachs [cm/a]	WK III Zuwachs [cm/a]	WK IV Zuwachs [cm/a]
AK I 0 bis 20	0,78	0,455	0,707	0,714	0,988
AK II 21 bis 40	0,67	0,455	0,696	0,896	0,624
AK III 41 bis 60	0,49	0,455	0,358	0,505	0,174
AK IV 61 bis 80	0,40	0,455	0,389	0,372	0,213
AK V > 80	0,34	0,455	0,309	0,219	0,359

AK = Altersklasse; WK = Wachstumsklasse

Spalte 3 in Tab. 6). Bei den WK II bis IV sind die Raten im Verlauf der ersten zwei Altersklassen am höchsten. Später nehmen sie abrupt ab. Die schnell wachsende WK IV zeigt sowohl die höchste (0,988 cm/a AK I) als auch die niedrigste Wachstumsrate (0,174 cm/a AK III). Diese deutlichen Unterschiede des Wachstums im Lebenslauf eines Baumes bestätigen die dringliche Information über die Altersverteilung eines Bestandes für die Berechnung der künftigen oberirdischen Holzbiomasse.

Das tatsächliche Pflanzjahr der Einzelbäume ist in dem Straßenbaumkataster oft nicht angegeben bzw. ungenau datiert. Die historische und aktuelle Entwicklung der Silberhöhe lassen jedoch den Schluss auf einen generell recht jungen Baumbestand zu. Auf der bis zum Jahr 1979 ackerbaulich genutzten Fläche (Geiss et al. 2002: 8) kann ein nennenswerter Baumbestand zunächst ausgeschlossen werden und mit der Entstehung der Großwohnsiedlung Silberhöhe geht eine starke Versiegelung einher. In einigen Quellen wird der ursprünglich mangelnde Grünbestand des dichten Wohngebietes angesprochen (vgl. Geiss et al. 2002: 126

oder Neubert 2009). Die Zeit der intensiven Aufforstung im Sinne der „Waldstadt“ begann zwischen 2003 und 2004 (BMVBS/ BBSR 2009a: 51). Da die Pflanzmaßnahmen zumeist mit Starkbäumen durchgeführt wurden (Pohl 2011), kann das Pflanzalter dieser Bäume auf neun Jahre generalisiert werden. Eine genaue Bestimmung des Alters ist zwar nicht möglich, zumindest aber eine Eingrenzung. Der älteste Baum (Pflanzjahr 1993) erreicht im Jahr 2025 demnach ein Alter von 34 Jahren. Das Wachstum bis zur Altersklasse (AK) II (< 40 Jahre vgl. von Frenzel 2009) wird also nicht überschritten. Die kartierten BHD im Jahr 2010 bilden die Grundlage der Berechnung. Bis zum Ende der AK I (< 20 Jahre) wird deren Zuwachs bis 2015 mit dem artspezifischen Wert der Wachstumsklasse ermittelt. Von 2016 bis 2025 wird schließlich die jährliche Wachstumsrate der zweiten AK angewandt. Die Schätzung der plotskalierten Holzbiomasse erfolgt mit einem neuen Durchmesser nach dem gleichen Prinzip, welches bereits

Tabelle 7. Wachstumsklassen und die Zugehörigkeit der Baumarten in der „Waldstadt-Silberhöhe“ (modifiziert übernommen von Frenzel 2009: 21; lat. Bezeichnung nach Schütt et al. 2006)

Wachstumsklasse 1	Wachstumsklasse 2	Wachstumsklasse 3	Wachstumsklasse 4
<i>Aesculus</i> (Kastanie)	<i>Abies</i> (Tanne)	<i>Acer</i> (Ahorn)	<i>Cornus</i> (Hartriegel)
<i>Betula</i> (Birke)	<i>Ailanthos</i> (Götterbaum)	<i>Corylus</i> (Hasel)	<i>Picea</i> (Fichte)
<i>Carpinus</i> (Hainbuche)	<i>Gleditsia</i> (Gleditschie)	<i>Prunus</i> (Rosengewächse)	<i>Platanus</i> (Platane)
<i>Castanea</i> (Esskastanie)	<i>Juglans</i> (Walnuss)	<i>Sambucus</i> (Traubenholunder)	<i>Populus</i> (Pappel)
<i>Eleagnus</i> (Ölweide)	<i>Platycladus</i> (Lebensbaum)	<i>Sorbus</i> (Mehlbeere)	<i>Pseudotsuga</i> (Douglasie)
<i>Fraxinus</i> (Esche)	<i>Tilia</i> (Linde)		<i>Robinia</i> (Robinie)
<i>Pinus</i> (Waldkiefer)			<i>Salix</i> (Weide)
<i>Quercus</i> (Eiche)			<i>Styphnolobium</i> (Schnurbaum)
<i>Ulmus</i> (Ulme)			

Tabelle 8. CO₂-Speicherpotential der oberirdischen Holzbiomasse in der „Waldstadt-Silberhöhe“ 2025 (Vollrodt 2011: 48)

oHB [t/ha] 2025	oHB [t/ha] der Gesamtfläche 2025	C 2025	CO ₂ 2025
-----------------	----------------------------------	--------	----------------------

für das Jahr 2010 beschrieben wurde. Tab. 8 zeigt das CO₂-Speicherpotential im Jahr 2025.

In dem Planungszeitraum zwischen 2010 und 2025 steigt das CO₂-Absorptionsvermögen um etwa 66%. Die Ergebnisse der skizzierten Pflanzalternativen zeigen, dass die Speicherleistung der Waldstadt-Silberhöhe mit 14.150 t CO₂ nicht das Optimum bis 2025 darstellt.

5.3 Pflanzalternativen im Vergleich der Optimierung

Das steigende Freiflächenpotential einer schrumpfenden Stadt bietet verstärkt die Möglichkeit einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung. Die in der Stadtumbau- und Entwicklungskonzeption der Waldstadt als „Umstrukturierungsbereiche“ definierten Flächen sowie der zentrale Grünzug erweitern das künftige Freiflächenpotential um etwa 50 ha. Hinzu kommen weitere 20 ha, die als „Vorbehaltsflächen für bauliche Nachnutzung“ ausgeschrieben wurden. Aufgrund eines anhaltenden Leerstandes werden diese Flächen für eine

temporäre Zwischennutzung als Kurzumtriebsplantage (KUP) umgestaltet. Die folgende Karte stellt die räumliche Verteilung des bis 2025 um insgesamt 70 ha erweiterten CO₂-Senkenpotentials dar.

Die bereits beschriebene Generalisierung der Aufforstung mit Starkbäumen findet auch in diesem Kapitel Anwendung. Nach dreimaliger Verpflanzung innerhalb der Baumschule haben diese Bäume zum Zeitpunkt ihrer Pflanzung einen Umfang von 20 cm (= BHD 6,4 cm) (Pohl 2011). Das mittlere Wachstum beruht auf der durchschnittlichen Zuwachsrate der Leipziger Straßenbäume. Es ist also nicht artspezifisch (Frenzel 2009: 29). Die Schätzung der Biomasse erfolgt mit der Mischformel für die Laubbäume im Leipziger Stadtraum⁵.

⁵ $oHB = EXP(a + b \times \ln(D))$ (PASTOR et al. 1986) mit $a = -3,172$ und $b = 2,709$ (nach FRENZEL 2009)

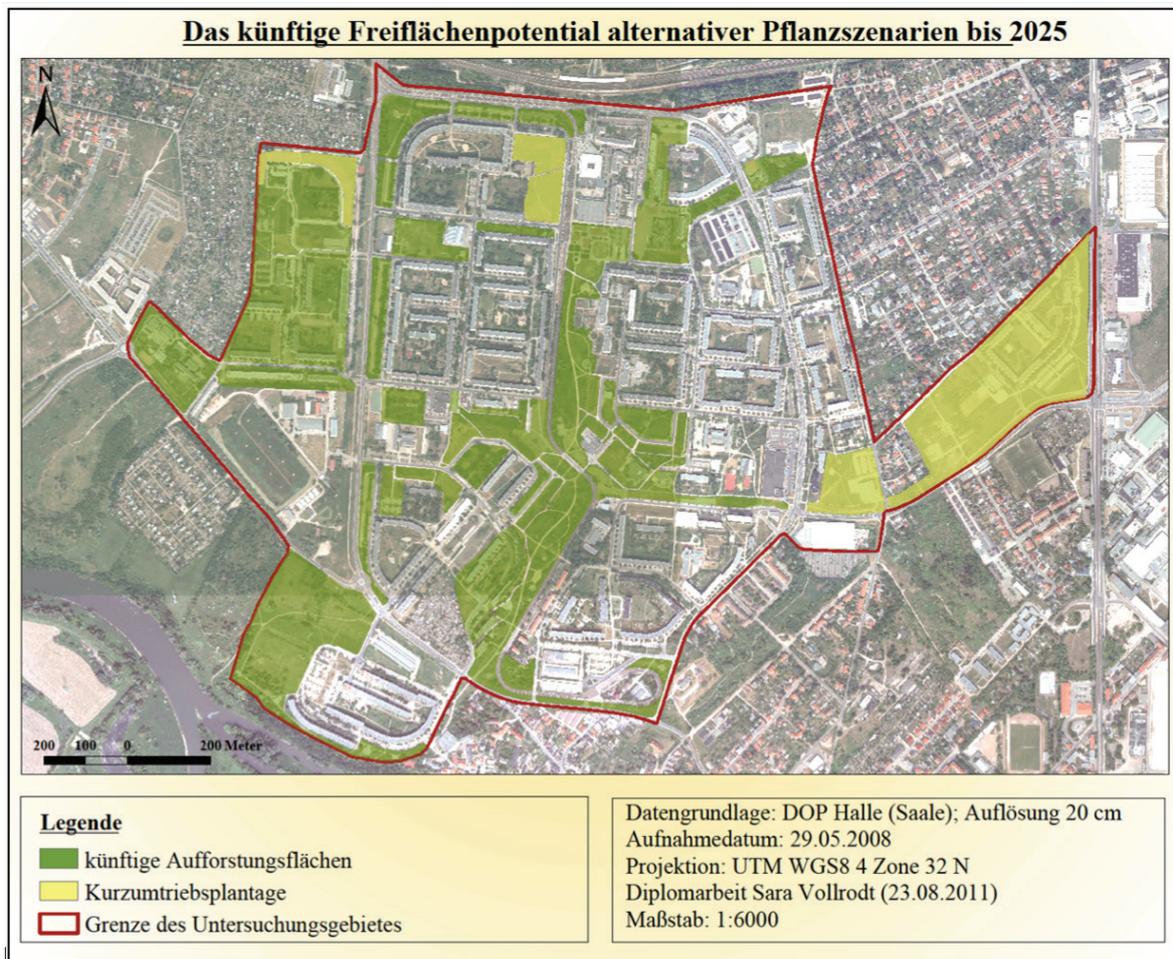


Abb. 4 Freiflächenpotential für weitere Aufforstungsmaßnahmen der Pflanzalternativen bis 2025 (LVermeo Sachsen-Anhalt 2008)

Pflanzalternative I: „Waldstadt 2025“

Diese Überlegung basiert auf dem Gestaltungskonzept der Pflanzungen für die Waldstadt-Silberhöhe und impliziert einen Stillstand der Aufforstungsmaßnahmen nach 2010. Die Einflussgrößen *Bestandsdichte* und *Flächenverfügbarkeit* bleiben unverändert. Die CO_2 -Speicherung der oberirdischen Holzbiomasse steigt natürlich bis zum Jahr 2025. Allerdings lediglich im Zuge des Wachstumsprozesses der Bäume und nicht durch zusätzliche Aufforstungsmaßnahmen. Eine *aktive* Verbesserung der CO_2 -Speicherwirkung der „Waldstadt“ bleibt also aus.

Pflanzalternative II: „Urbane Wald“

Die Renaturierungsstrategie „Urbane Wald“ wird infolge der langsamen Entwicklungsphase der Bäume prinzipiell als *dauerhafte* Nachnutzung betrachtet. Die prognostizierten Freiflächen von 70 ha werden hier mit einer Baumdichte von 203 Bäumen pro Hektar aufgeforstet. Diese Baumzahl orientiert sich an der bereits erfolgreich umgesetzten Landschaftsgestaltung

am Anhalter-Platz. Hochgerechnet ergibt die aufgeführte Bestandsdichte eine Gesamtzahl von 14.210 Bäumen. Um dies zu erreichen, wird eine jährliche Pflanzung von 950 Bäumen⁶ im Zeitraum von 2010 bis 2025 angenommen. Mit der Untergliederung in: a) Pflanzungen ausschließlich langsam wachsender Gattungen, b) Pflanzungen eines Mischbestandes *mittleren Wachstums* und c) Pflanzungen ausschließlich *schnell wachsender* Gattungen wird die Einflussgröße des artspezifischen Wachstums auf die Biomasseproduktion näher betrachtet. Die bereits beschriebenen Zuwachsraten finden hier erneut ihre Anwendung. Der Mischbestand symbolisiert eine heterogene Baumartenverteilung deren Wachstumsrate im mittleren Bereich liegt. Die schnell wachsenden Gattungen *Platanus* oder *Populus* stehen im Wechsel mit langsam wachsenden Gattungen, wie *Fraxinus* oder *Quercus*. Ebenso gehören die im Verlauf der Aufforstungsmaßnahmen erwähnten Wildobstwiesen,

⁶14.210 Bäume dividiert durch 15 Jahre

41	8.843	4.112	14.150
----	-------	-------	--------

Tabelle 9. CO₂-Speicher der Pflanzalternative II: „Urbaner Wald“ (Vollrodt 2011: 54)

Wachstumsverhalten	jährliche Zunahme oHB [t]		jährliche Zunahme CO ₂ [t]	
	oHB [t]	oHB [t] 2025	CO ₂ [t]	CO ₂ [t] 2025
langsames Wachstum	22,2	333,5	35,6	533,6
mittleres Wachstum	36,4	546,3	58,3	874,1

Linden und Ahornbestände mit einem mittleren Wachstum zum Inventar.

Tab. 9 zeigt das künftige CO₂-Sequestrierungspotential der waldähnlichen Aufforstung bis 2025. Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung, dass die Aufforstung vorrangig schnell wachsender Baumarten das quantitative Optimum der CO₂-Sequestrierung beschreibt. Mit einem jährlichen Zuwachs von 58 t oHB werden 92 t des Treibhausgases CO₂ gespeichert. Bis zum Jahr 2025 ergibt dies eine maximale CO₂-Senkenwirkung von 1.385 t.

Der Mischbestand, bestehend aus Gattungen vorwiegend mittleren Wachstums, verbessert die jährliche CO₂-Absorption um etwa 58 t. Bei der Umsetzung dieser Pflanzmaßnahme würde die Waldstadt-Silberhöhe im dem begrenzten Planungshorizont bis 2025 etwa 875 t CO₂ zusätzlich speichern. Die mindeste Verbesserung der CO₂-Speicherung bis 2025 liegt bei rund 533 t. Im Vergleich zu Bäumen schnellen Wachstums reduziert die ausschließliche Pflanzung langsam wachsender Baumarten die jährliche CO₂-Sequestrierung um fast 60% auf 35 t/a. Diese Spannweite verdeutlicht die Wichtigkeit des artspezifischen Wachstumsverhaltens für die quantitative Optimierung der CO₂-Senkenwirkung.

Pflanzalternative III: „Regenerativer Waldpark“

Bereits die Bezeichnung dieser dritten Pflanzalternative deutet eine vielseitige und heterogene Gestaltung der künftigen Freiflächen an. Weniger dicht bepflanzte Parkanlagen bieten einen attraktiven Treff- und Erholungspunkt für die Anwohner. Sie wechseln sich ab mit kleinen dichten Waldbeständen und mehrreihigen Baumhainen.

Die Aufforstungsoption „Regenerativer Waldpark“ wirkt zweigleisig. Zum einen gilt es, den aktuellen Kurs der forstlichen Renaturierung fortzusetzen und auszubauen. Zum anderen wird mit der Erweiterung der bereits vorhandenen Kurzumtriebsplantage (KUP) ein neuer Weg der künftigen Stadtentwicklung beschrieben. Eine KUP besteht aus schnell wachsenden Kulturen

mit einem raschen Jugendwachstum und einem hohen Ausschlagvermögen der Stecklinge (BfN 2010: 3). Eine Energieerzeugung im Stadtraum wird von der BMVBS/ BBSR (2009c) als denkbare Strategie für eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung beschrieben. Der „Handlungskatalog - Optionen erneuerbarer Energien im Stadtraum“ (BMVBS / BBSR 2009c) oder die ExWoSt-Studie „Nutzung städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien“ (BMVBS / BBSR 2009d) betonen die Aufgabe des urbanen Raumes dem Klimawandel „verstärkt durch Wege zur Energieeinsparung und zur Erzeugung erneuerbarer Energie“ zu begegnen (ebd.: 3).

Nachdem die ersten KUP auf den Abrissflächen entlang des Lüneburger Bogens im Stadtteil Halle-Neustadt eingerichtet wurden, folgte die dritte KUP in der Silberhöhe. Entlang der Willi-Bredel-Straße wurden im März 2009 rund 8.000 Stecklinge der Art *Populus balsamifera* auf einer Abrissfläche von 9.000 m² gepflanzt (HWS 2011). Die Hallesche Wasser- und Stadtwirtschaft GmbH formulierte diese Trendsetzung mit der Symbiose des verstärkten Einsatzes von Biomasse zur klimaneutralen Energieerzeugung zusammen mit einer imagesteigernden, temporären Zwischennutzung städtischer Freiflächen (ebd.). Gehölz wirkt nicht allein als langfristige CO₂-Senke für den Klimaschutz. Die Möglichkeit der Energiegewinnung aus Holzbiomasse bietet auch eine „indirekte“ CO₂-Senkenfunktion. Die Anlage einer KUP wirkt CO₂-neutral indem sie zusätzliche Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger verhindert und ihre energetische Nutzung für Strom oder Wärme lediglich bereits zuvor emittiertes CO₂ frei setzt (Fischlin et al. 2006: 29). Die künftige Freifläche wird in

drei Teile segmentiert und mit einer unterschiedlichen Bestandsdichte aufgeforstet:

Wald: Fläche von 23 ha mit waldähnlicher Baumdichte von 203 BZ/ha,

Park: Fläche von 23 ha mit parkähnlicher Baumdichte von 76 BZ/ha,⁷

KUP: Fläche von 24 ha mit der Anlage einer Kurzumtriebsplantage.

Die Flächenanteile des Waldparks mit einer abwechselnden Bestandsdichte werden mit einem heterogenen Mischbestand aufgeforstet. Die möglichen Baumarten, wie *Fraxinus*, *Acer*, *Prunus*, *Tilia* oder *Populus* vertreten die verschiedenen Wachstumsklassen.

Die Vorbehaltsflächen für eine bauliche Nachnutzung im nördlichen und östlichen Teil der Silberhöhe werden ab 2010 im Sinne einer KUP mit der schnell wachsenden *Populus balsamifera* aufgeforstet.

⁷ Plot im zentralen Grünzug als Praxisbeispiel für die Baumbestandsdichte eines Landschaftsparks in der Waldstadt-Silberhöhe.

Zum Zeitpunkt der jeweiligen Rotation, also der Ernte während der Vegetationspause im Winter, haben die jungen Bäume einen durchschnittlichen BHD von 10 cm und eine Höhe von etwa 10 m (Hartmann 2002: 83). Ein geeigneter Pflanzverband, der Abstand zwischen den Pflanzen und die gesamte Pflanzzahl beeinflussen die Erntemasse (vgl. Scholz et al. 2006: 8). Laut Spangenberg (2010: 14) erfolgt die Pflanzung von etwa 20 cm hohen Pappelstecklingen häufig in Einzelreihen. Ein Bestand von ca. 10.000 Pappelstecklingen pro ha liefert bei einem gering bis mäßigem Wasserangebot (<500 mm/a) im Durchschnitt ein jährliches Ertragspotential von ca. 8 t/ha⁸ Dendromasse/atro (vgl. Tab. 10) (Scholz et al. 2006: 5).

Tab. 11 zeigt die Schätzung einer jährlichen CO₂-Sequestrierung von etwa 12,8 t/ha. Extrapoliert auf die Flächenverfügbarkeit von 24 ha wirkt die KUP als jährliche CO₂-Senke für 307 t CO₂. Petzold et al. (2010) zufolge liegt die Lebensdauer einer solchen Anlage im Durchschnitt zwischen 20 bis 30 Jahren (ebd.: 44). Der Planungszeitraum bis 2025 genügt bei einem Rotationszyklus von vier Jahren für drei Ernten und einen erneuten Austrieb der Stecklinge für die letzten drei Jahre.

⁸ Halle (Saale) im Mitteldeutschen Trockengebiet mit < 500mm/a (vgl. STADT HALLE 2010)

schnelles Wachstum	57,7	865,4	92,3	1384,7
--------------------	------	-------	------	--------

Tabelle 10. Anzahl der Stecklinge und geschätzte Dendromasse für die künftige Kurzumtriebsplantage (nach Spangenberg 2010: 13)

Rotationszyklus (RZ)	Stecklinge/ ha	jährliche Dendromasse/ ha
4 Jahre	10.000	8 t

Tabelle 11. Produktion von Dendromasse und die CO₂-Absorption der Kurzumtriebsplantage im Untersuchungsgebiet (Vollrodt 2011: 57)

atro [ha/a]	atro [ha/4xa]	atro [24 ha/a]	atro [24 ha/4xa]	CO ₂ [ha/a]	CO ₂ [24 ha/a]	CO ₂ [ha/4xa]	CO ₂ [24 ha/4xa]
8	32	192	768	12	307	51	1.228

Angaben in Tonnen, atro = Dendromasse mit absolutem Trockengewicht

Tabelle 12. Freiflächengestaltung des „Waldparks“ bis 2025 (Vollrodt 2011: 58)

Eigenschaften der Aufforstung	Park	Wald
Bestandsdichte (BZ/ha)	76	203
Bestandsdichte Σ_{23ha}	1.748	4.669
jährliche Pflanzung (Stk.)	116	311

Tabelle 12. Freiflächengestaltung des „Waldparks“ bis 2025 (Vollrodt 2011: 58)

Eigenschaften der Aufforstung	Park	Wald
Waldpark	427 Bäume jährlich insgesamt 6417 Bäume bis 2025	
Baumarten	Mischbestand: u.a. <i>Platanus</i> , <i>Acer</i> , <i>Quercus</i>	
jährlicher Durchmesserzuwachs	0 bis 20 Jahre Altersklasse I: 0,78 cm/a 21 bis 40 Jahre: Altersklasse II: 0,67 cm/a	

Angaben in Tonnen

Tabelle 13. CO₂-Senkenpotential der Teilflächen des „Regenerativen Waldparks“ (Vollrodt 2011: 58)

	Park	Wald	KUP
jährliche Holzbiomasse	5	14	192
jährliche CO ₂ -Sequestrierung	8	22	307
Holzbiomasse 2025	78	210	2.880
CO ₂ -Speicherung 2025	125	336	4.608
Gesamte CO ₂ -Speicherung 2025	462		5.070
Gleichung zur Berechnung der Holzbiomasse: $EXP(a + b \times \ln(BHD))$ (a= -3,172; b= 2,709)			

Angaben in Tonnen

Im Verlauf eines Rotationszyklus produziert die KUP in der Waldstadt-Silberhöhe 768 t Dendromasse und absorbiert 1.229 t CO₂ aus der städtischen Atmosphäre. Nach der Transformation der Dendromasse zur Energieerzeugung wirkt die Dendromasse durch die Substitution fossiler Rohstoffe klimaneutral.

Tab. 12 zeigt die Rahmenbedingungen für die Schätzung der Ergebnisse des Waldparks. Die Renaturierung der übrigen 46 ha im Stil eines Waldparks schafft bis 2025 mit ca. 19 t/a oberirdischer Holzbiomasse einen zusätzlichen CO₂-Speicherraum von 288 t. Die jährliche CO₂-Sequestrierung beträgt 30 t und stellt bis zum Jahr 2025 ein dauerhaftes Senkenpotential für 462 t CO₂ bereit.

Das enorme CO₂-Speicherpotential einer KUP wird durch einen Vergleich der Teilflächen „Park“ – „Wald“ und „KUP“ in Tab. 13 deutlich. Mit der Annahme einer Unterlassung der energetischen Nutzung der Dendromasse böte die KUP im Jahr 2025 eine Senke für 4.608 t CO₂.

Die steilen Einbrüche der jährlichen CO₂-Speicherung in Abb. 5 veranschaulichen den Vier-Jahres-Zyklus der Ernte und die damit verbundene Freisetzung

des gespeicherten CO₂. Ungeachtet dessen zeigt die grau markierte Trendlinie einen Anstieg der CO₂-Senkenwirkung im Zeitverlauf. Die CO₂-Speicherung reduziert sich alle vier Jahre auf die Sequestrierung der dauerhaft bepflanzten Flächen von 462 t CO₂.

5.4 Auswahl der Baumarten

Das Ziel einer Erhöhung des CO₂-Speicherpotentials bis 2025 gibt zunächst Anlass, ausschließlich die Pflanzung schnell wachsender Gattungen zu empfehlen. Dabei bleibt jedoch die Lebensdauer der Gehölze unberücksichtigt. In der anschließenden Diskussion wird auf die tatsächliche Eignung schnell wachsender Gattungen als optimale CO₂ noch einmal näher eingegangen.

Anatomie des Holzes - artspezifische Rohdichte und Porenvolumen

Das Kriterium einer höheren Rohdichte während der Baumartenwahl als Option zur Optimierung des CO₂-Speicherpotentials eines urbanen Waldes findet mit einem Vergleich zwischen Hartholz- und Weichholzarten seine Bestätigung. Das Hartholz der *Quercus rubra* mit einer Rohdichte von 0,64 g/cm³ und einem BHD von

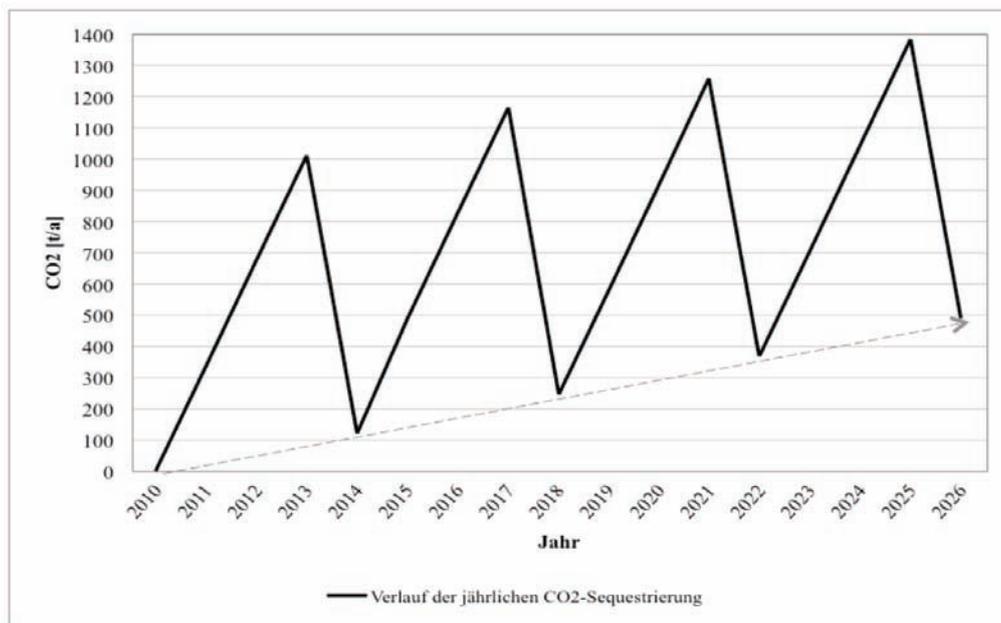


Abb. 5 Verlauf der jährlichen CO₂-Sequestrierung der Pflanzalternative III „Regenerativer Waldpark“ bis 2025 (eigene Darstellung 2011)

20 cm bietet mit 188 kg an oberirdischer Holzbiomasse einen Speicher für 302 kg CO₂. *Pinus silvestris* (Wald-Kiefer) als charakteristische Weichholzspezies mit einer Rohdichte von 0,49 g/cm³ stellt mit einem adäquaten BHD dagegen etwa 35% weniger an Holzbiomasse bereit. Sie besitzt also eine geringere Speicherleistung von etwa 192 kg CO₂.⁹

Die im Jahr 2010 kartierten Baumarten in der Waldstadt-Silberhöhe zeigen in der Mehrheit (55%) eine mittlere bis sehr hohe Rohdichte zwischen 0,55 und 0,87 g/cm³. Auffällig ist, dass besonders die Nadelbäume eine einheitlich geringe Rohdichte zwischen 0,35 und 0,45 g/cm³ aufweisen. Eine besonders hohe Rohdichte mit einer Spanne von 0,7 und 0,87 g/cm³ charakterisieren die Baumarten *Prunus domestica* (Mirabelle) und *Prunus mahaleb* (Felsen-Kirsche) sowie *Robinia pseudoacacia* (Robinie) und *Sorbus intermedia* (Schwedische Mehlbeere). Die Häufigkeitsverteilung der Baumarten im Untersuchungsgebiet zeigt weiterhin einen überwiegenden Anteil an schwerem Hartholz mit einer höheren Rohdichte. Dazu zählen die Hauptgattungen im Untersuchungsgebiet *Acer* (28% Anteil) und *Prunus* (14% Anteil). Das Holz der Hauptgattungen *Populus* (14% Anteil) und *Salix* (7% Anteil) ist dagegen eher weich und

leicht (Rohdichtewerte nach Jenkins et al. 2004; Schütt et al. 2006; Trendelenburg 1995).

Artenwahl im Kontext der Anpassung an den städtischen Klimawandel

Die Klassifizierung der aufgenommenen Baumarten in der Waldstadt-Silberhöhe nach der KLAM (vgl. Roloff et al. 2008) zeigt, dass die bisherige Artenwahl zu etwa 50% bereits an die prognostizierten Stressfaktoren Trockenheit und Winterfrost angepasst ist. Lediglich die Pflanzungen von *Acer pseudoplatanus*, *Aesculus hippocastanum*, *Fraxinus ornus*, *Prunus padus* und *Ulmus minor* sollten in Zukunft eingestellt werden. Aufgrund ihrer fehlenden Toleranz gegenüber Trockenstress sind sie für den Stadtraum nur minder empfehlenswert. *Fraxinus ornus* wird in der Kategorie Trockentoleranz zwar als sehr geeignet eingestuft, ihre Frosthärte jedoch eingeschränkt bewertet.

6. Diskussion

6.1 Beitrag der „Waldstadt“ zu einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung

Das Ziel einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung wird in dieser Arbeit als Symbiose des Klimaschutzes/der Anpassung und der Stadtschrumpfung definiert. Der Fokus liegt im Ausbau des urbanen Gehölzbestandes als CO₂-Senke und dessen Beitrag zum Klimaschutz. Die allometrischen Biomasseschätzungen für die Waldstadt-Silberhöhe ergeben eine gesamte Absorption von 14.150 t des Treibhausgases CO₂ aus der städtischen Atmosphäre. Umgerechnet auf

⁹Quelle der Rohdichten von FROMMHOLD 2008: 43; Berechnung der oHB nach den Gleichungen in VOLLRODT 2011

Tabelle 14. Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume (Burkhardt et al. 2008: 40-46)

Wirkungsbereiche	<ul style="list-style-type: none"> • Ökosystemdienstleistungen urbaner Wälder
Lufthygiene	<ul style="list-style-type: none"> • Filterleistung von Aerosolen und Schadstoffen
Lärm- und Lichtfilter	<ul style="list-style-type: none"> • Schallschutz und Minderung der UV-Strahlung
Boden und Wasserhaushalt	<ul style="list-style-type: none"> • Wind- und Erosionsschutz • Filterung- und Pufferwirkung von Schadstoffen • Verbesserung der Grundwasserqualität durch teilweisen Abbau von Schadstoffen infolge hoher biologischer Aktivitäten • Beschleunigung von Bodenbildungsprozessen und Herstellung natürlicher Bodenfunktionen <ul style="list-style-type: none"> • Hochwasserschutz aufgrund Wasserrückhaltungsvermögen
Klima	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlungseffekt durch Schattenwurf und Verdunstungskälte

die jährliche Emission der Wohnbevölkerung in der Silberhöhe von 149.800 t (11,3 t CO₂ pro Kopf/a * Einwohner in der Silberhöhe)¹⁰, relativiert sich dieser Wert. Die Bäume in der Waldstadt-Silberhöhe stellen ein Reservoir für <10% dieser *jährlichen* CO₂-Emission bzw. die jährliche Emission von etwa 1.252 Bewohnern dar. Diese Relation mindert jedoch nicht ihren Beitrag für die Stadt Halle zum Klimaschutz. Die Umsetzung des Stadtentwicklungskonzeptes „Waldstadt“ für die Silberhöhe kann als klimawandelgerecht bewertet werden. Im Sinne der Anpassung an die klimatischen Veränderungen erfüllt die Waldstadt die ihr zugeordneten ökosystemaren Dienstleistungen. Die Verdunstungskälte sowie die Schattenspende erlauben den nötigen Effekt der Abkühlung. Zudem wird die Frischluftzufuhr angeregt und damit die Luftqualität verbessert (Bruse 2003: 68f). Den bereits spürbaren und prognostizierten Veränderungen der Niederschlagsverteilung (Starkregen oder sommerliche Trockenheit) wird u.a. mit dem Rückbau der Versiegelung begegnet. Dies kommt einer Erhöhung des Grundwasserspiegels durch die nun mögliche Versickerung zugute (vgl. MKULNV 2011). Tab. 14 nennt weitere Dienstleistungen, die das Entwicklungskonzept „Waldstadt-Silberhöhe“ bereitstellt.

Auch Burkhardt et al. (2008) stellen fest, dass der Stadtbau zur Anpassung an den Klimawandel keine bessere Alternative bietet, als die nach dem Abriss des

¹⁰ Rechenweg: $932.881 \cdot 10^3 \text{ t CO}_2\text{-Emission (31.12.2006)} : 82.315 \text{ Mio. Einwohner Deutschlands (31.12.2006)} = 11,3 \text{ t CO}_2 \text{ pro Kopf/a (StaBa 2009: 313 und StaBa 2008: 36)} * 13.256 \text{ Einwohner der Silberhöhe (Stadt Halle 2011: 113)}$

Wohnbestandes entstehenden Freiflächen aufzuforsten (ebd.: 123). Außerdem findet das beschriebene, breite Leistungsspektrum eine hohe Akzeptanz in der lokalen Bevölkerung. Ihr Einfluss auf die Wirkungsbereiche in der oben abgebildeten Tab. 14 fördert das Wohlbefinden der Bewohner indem ihre Vulnerabilität gegenüber klimatischen Veränderungen gemindert wird.

6.2 Methodendiskussion zur Minderung von Unsicherheiten

Schätzgenauigkeit des Datenbestandes

Der nötige Umfang der Kartierarbeiten für eine möglichst hohe Schätzgenauigkeit war zunächst unklar, da die Anzahl und die Größe der Plots in den veröffentlichten Studien eine hohe Schwankungsbreite zeigen (siehe Vergleich in Tab. 15).

In der Studie „*Effect of Plot and Sample Size on Timing and Precision of Urban Forest Assessments*“ von Nowak et al. (2008) wird ein ausreichender Stichprobenumfang mit 200 Plots je 0,04 ha (1/6 acre) mit einem relativen Standardfehler (RSE) von etwa 12% für eine möglichst hohe Schätzgenauigkeit definiert (ebd: 389). Die nachfolgende Abb. 6 zeigt, wie der RSE ab 50 Plots abrupt sinkt und ab ca. 200 stetig bleibt und eine akzeptable Schätzgenauigkeit gewährleistet.

Das Untersuchungsgebiet Waldstadt-Silberhöhe umfasst in der Relation zu einer ganzen Stadt mit 213 ha nur eine geringe Flächengröße. Der Stichprobenumfang der Kartierung des Stadtteils Silberhöhe konnte daher ohne Genauigkeitsverluste von 200 auf 60 Plots reduziert werden. In einer persönlichen Anfrage per E-Mail bestätigte Nowak (2011) diese Entscheidung: „*The question is how much can you afford to do vs. precision,*

Tabelle 15. Auswahl verschiedener Studien mit einer Datensammlung über das Prinzip der zufälligen Stichprobenverteilung (eigene Auswahl)

Autor	Untersuchungsgebiet	Fläche der Plots	Anzahl der Plots
McPherson et al. 2007	Sacramento	0,01 ha	675
Nowak 1994	Chicago	0,04 ha	652
Nowak et al. 2002b	Brooklyn	0,04 ha	202

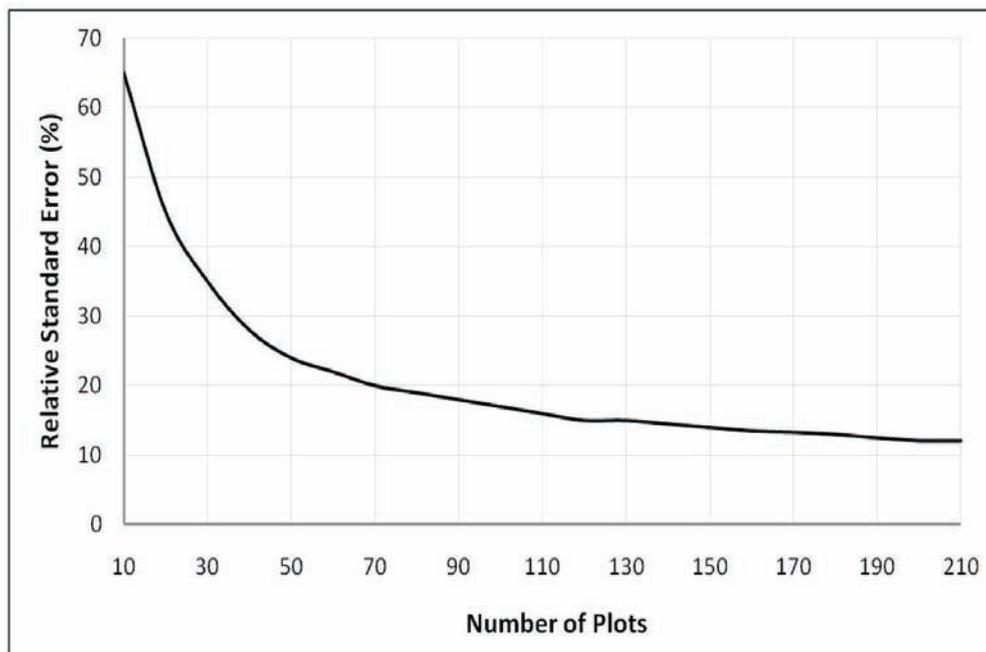


Abb. 6 Geschätzter relativer Standardfehler der absoluten Baumzahl je nach Stichprobenumfang (Plotfläche: 0,04 ha) (Nowak et al. 2008: 389)

I would suggest starting with 30-50 plots to start and analyze the data to see your standard error estimates“. Nowak et al. (2008) verglichen außerdem den Kosten-Nutzen-Effekt verschiedener Plot-Größen (1/24 acre = 0,02 ha; 1/10 acre = 0,04 ha; 1/6 acre = 0,067 ha). Diesem Ergebnis zufolge gewährleistet bereits eine Flächengröße von 0,04 ha eine ausgeglichene Bilanz zwischen (Zeit-) Kosten und der Schätzgenauigkeit (ebd.: 388). Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs dieser Arbeit und die nicht zeitaufwändig zu messenden Daten wurde die Größe der Plots auf das Maximum von 0,067 ha (15 m Radius) festgelegt.

Schätzgenauigkeit der jährlichen Zuwachsraten

Die Schätzung einer künftigen urbanen CO₂-Sequestrierung impliziert bei der Anwendung von Zuwachsraten mit forstlichem Hintergrund ein hohes Fehlerpotential. Die städtischen Wachstumsraten eines

Einzelbaumes sind häufig höher als im natürlichen Bereich. McPherson et al. (1999) führt dies zum Teil auf die zahlreichen freistehenden Einzelbäume ohne Konkurrenz um Licht, Wasser oder Nährstoffe zurück. In einem dichteren Baumbestand im Stadtraum es eher umgekehrt. Zu begründen ist das u.a. mit den minderen Standorteigenschaften im Vergleich zu natürlichen Wachstumsbedingungen (ebd.: 5). Aus diesem Grund wurden die art- und altersspezifischen Wachstumsraten aus dem Leipziger Stadtraum von Frenzel (2009) übernommen.

Generalisierte und Urbane Gleichungen zur Minderung von Unsicherheiten

Die literaturbasierte Auswahl allometrischer Regressionsgleichungen für die Schätzung der Biomasse birgt hohe Unsicherheiten. Zur Diskussion steht die prinzipielle Frage der Übertragbarkeit solcher Gleichungen

auf differente Standortbedingungen. Die urbane Wärmeinsel, das Nährstoff- und Wasserangebot oder die Bestandsdichte differenzieren das Wachstumsverhalten der Stadtbäume stark von den Waldbäumen. Diese Faktoren schränken die Übertragbarkeit der forstlich ermittelten Gleichungen auf andere Regionen oder die Anwendung auf einem großräumlichen Niveau ein (Jenkins et al. 2003: 13). Der Forschungsstand zur Schätzung der Holzbiomasse unter urbanen Standortbedingungen ist aufgrund der Kosten-Nutzen-Effizienz noch begrenzt. Explizit auf urbane Standortbedingungen angepasste und artspezifisch ermittelte Gleichungen gibt es bisher kaum (McHale et al. 2009). Daher werden generell Formeln aus forstlichen Untersuchungen zur Schätzung der urbanen Holzbiomasse ausgewählt (Jenkins et al. 2003: 13). So auch die artspezifischen Gleichungen dieser Arbeit.

Eine Lösungsoption für die Minderung der Ungenauigkeit beschreibt Nowak (1994) für seine Studie in „*Chicago's Urban Forest*“ in einer Reduzierung der geschätzten Biomasse der Stadtbäume um 20%. Er stellt die Ergebnisse forstlicher- und urbaner Gleichungen gegenüber. Die häufige Überschätzung mit forstlich ermittelten Parametern wird hier in den Formschnitten und im dem lichterem Baumbestand im Stadtraum vermutet. Durch die fehlende Lichtkonkurrenz ist das Kronenvolumen zwar weiter, das Höhenwachstum dagegen geringer ausgeprägt als in einem dichten Waldbestand (ebd.: 89). Für die Erstellung urban-basierter Gleichungen stellen McHale et al. (2009) eine interessante

Art der genauen Vermessung eines Stadtbaums ohne Fällarbeiten vor. Mit dem System des terrestrischen Laserscanning wird das Volumen eines Baumes in Form einer drei-dimensionalen Punktwolke aufgenommen. Die Umrechnung des Volumens in das Gewicht der Biomasse erfolgt über die artspezifische Rohdichte (ebd.: 98). Diese Datenaufnahme ermöglicht die Ermittlung artspezifischer „*urban-biomass-equations*“ (ebd.: 96).

Die Gegenüberstellung der auf diese Weise ermittelten Holzbiomasse mit dem Resultat artspezifischer Gleichungen aus dem Forst zeigt eine enorme Variabilität der Erträge je nach Art, Population oder Gemeinschaft. Die von Nowak (1994) als Trend formulierte Überschätzung wird mit etwa 18% auch in Fort Collins bestätigt. Als Erklärung werden die zugleich festgestellten differenten Holzeigenschaften der Stadtbäume gegenüber natürlichen Bäumen herangezogen. Ihre spezifische Rohdichte ist häufig niedriger als in einem natürlichen Bestand (McHale et al. 2009: 100). Pflegemaßnahmen, wie Düngung und Bewässerung können das jährliche Wachstum in der Stadt fördern. Ein schnelles Wachstum wirkt sich mit einem höheren Porenvolumen auf die Holzstruktur aus. Die Abweichungen von den urbanen Ergebnissen sind jedoch nicht generalisierbar. Das genaue Maß an Über- oder Unterschätzung kann demnach nicht definiert werden und eine nachträgliche Anpassung ist nicht möglich.

Die Gleichungen aus urbanen Studien verbessern die Schätzgenauigkeit zwar signifikant, ihre Verfügbarkeit ist jedoch begrenzt. Forstlich ermittelte

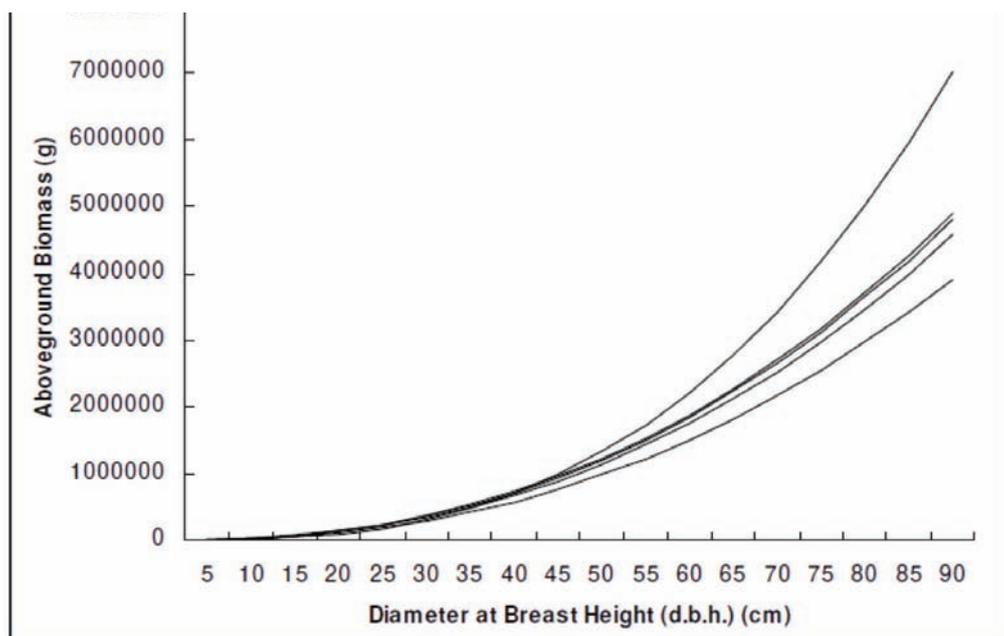


Abb. 7 Oberirdische Biomasse der Douglasie, geschätzt über fünf allometrische Regressionsgleichungen (Jenkins et al. 2004: 10)

Schätzparameter bergen eine gewisse Ungenauigkeit. Bei dem aktuellen Stand der Forschung bewährte sich jedoch deren Verwendung zur Ermittlung der Holzbiomasse eines urbanen Waldes. Eine überlegenswerte Option zur Reduktion der Schwankungen liegt in einer Standardisierung der Formelauswahl und in der Verwendung durchschnittlicher, generalisierter Gleichungen.

Eine Entscheidungshilfe bei der Formelauswahl stellen generalisierte Mischformeln dar. Sie entstehen aus einer Vielzahl an Formeln, die bevorzugt unterschiedliche Standortbedingungen widerspiegeln. Infolge dessen eignen sie sich besonders für großräumig angelegte, bzw. standortunabhängige Studien (Muukkonen 2007: 157). Die heterogene Datenbasis mindert den Grad der Unsicherheiten und lässt die Übertragbarkeit, z.B. nordamerikanischer Studien auf den mitteldeutschen Raum zu (Annahme der Autorin). Daher fanden

insbesondere die Gleichungen von Jenkins et al. (2003) für die Ermittlung der Holzbiomasse ihre Anwendung.

Umfangreiche Formelsammlungen verdeutlichen die Vielzahl artspezifischer Gleichungen mit entsprechend heterogenen Schätzungsparametern (vgl. Zianis et al. 2005; Jenkins et al. 2003 oder Jenkins et al. 2004). Muukkonen (2007: 157) beschreibt die damit verbundene Schwierigkeit der Auswahl: „[...] it is impossible to know which equations to choose for a particular species and site. Abb. 7 verdeutlicht am Beispiel der Douglasie den Einfluss einer Gleichung auf die Schätzung der Biomasse. Trotz eines identischen BHD als gegebene Variable beschreibt die Anwendung verschiedener Formeln eine hohe Schwankungsbreite der oberirdischen Biomasse.

Jenkins et al. 2004 betont die Korrelation zwischen der Schwankungsbreite und dem BHD. In Abb. 7 wird ersichtlich, dass die Differenz der Schätzergebnisse aus den verschiedenen Gleichungen erst ab einem BHD von etwa 35 cm zum Tragen kommt. Der junge Baumbestand in der Waldstadt-Silberhöhe zeigt 2010 zwar nur einen BHD von durchschnittlich ca. 12 cm. Das jährliche

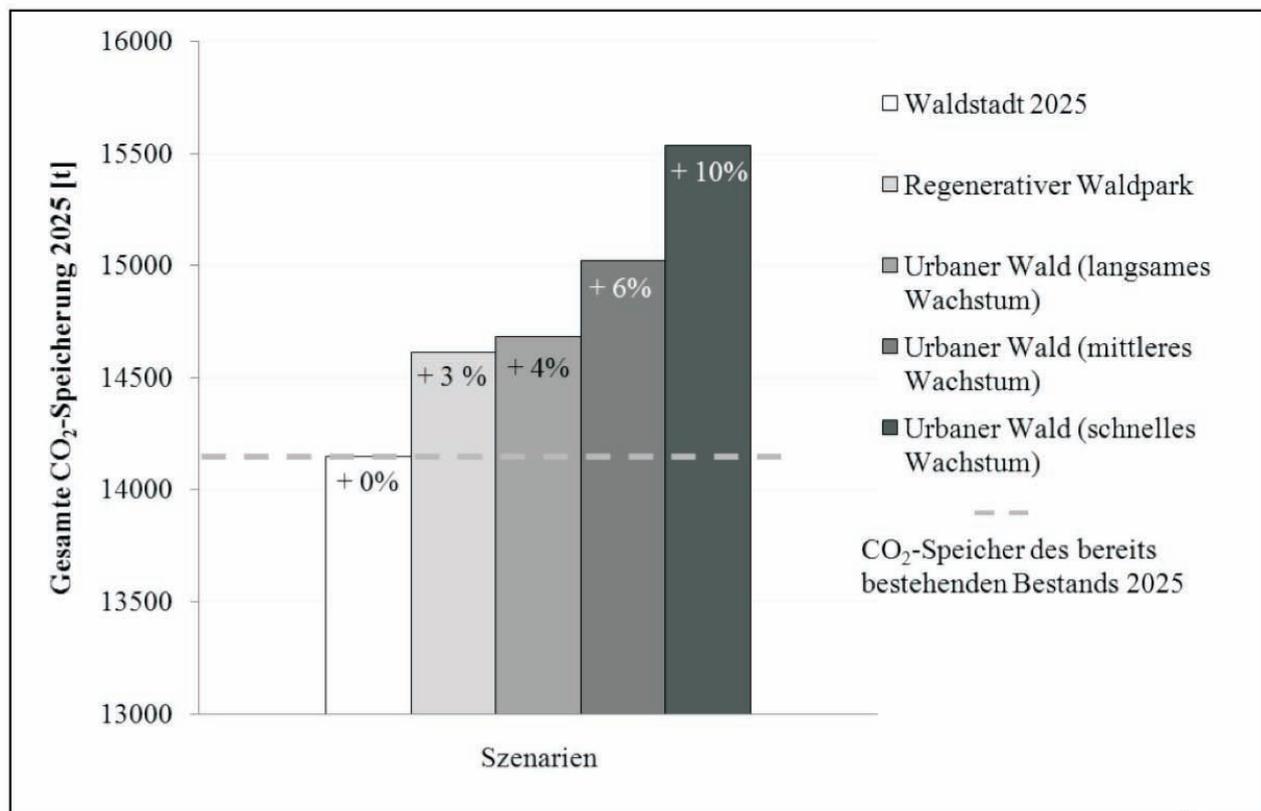


Abb. 8 Optimierungspotential der CO₂-Senkenwirkung der Pflanzalternativen (Vollrodt 2011: 70).

Wachstum der Bäume führt jedoch im Laufe der Zeit zur Überschreitung des „kritischen“ BHD-Wertes und hebt so das Maß an Unsicherheiten während der Formelauswahl. Die Vermutung einer Überschätzung und die Empfehlung der Voraussicht bestätigen sich mit dem prognostizierten Anstieg des durchschnittlichen BHD der Gehölze in der Silberhöhe um fast 50% innerhalb der nächsten 15 Jahre (im Jahr 2025 etwa 23 cm BHD).

6.3 Bestandsdichte und Artenwahl als Optimierungsfaktoren für künftige Pflanzungen

Die Beschreibung der alternativen Pflanzungen bis 2025 basiert auf einer Modifizierung des bisherigen Leitbildes der „Waldstadt“. Von der aktuell umgesetzten Aufforstungsstrategie wird bisher vorrangig die kulturelle Dienstleistung eines Stadtwaldes erwartet (siehe Stegemann 2010: 1). Impliziert wird zudem eine Aufwertung der Wohnqualität dank einer ökonomisch orientierten Imagesteigerung (siehe Stadt Halle 2007). Das neue Leitbild für den Planungszeitraum bis 2025 beschreibt die Neuorientierung hin zu einer Optimierung der urbanen CO₂-Speicherung. Als Einflussparameter wird zwischen der Bestandsdichte und dem generellen Wachstumsverhalten der gepflanzten Baumarten unterschieden. Abb. 8 zeigt das Optimierungspotential der CO₂-Speicherung der in dieser Arbeit vorgestellten Pflanzalternativen im Vergleich. Der Prozentwert *null* bedeutet keinesfalls eine ausbleibende Speicherfunktion. Dieser Wert beschreibt den *zusätzlichen* Effekt der Optimierung der CO₂-Speicherung zu den bereits umgesetzten Pflanzungen (*grün gestrichelte Linie*).

Aus dem Vergleich der Pflanzalternativen kann eine zunehmende Bestandsdichte eindeutig als wirkungsvolles Kriterium für die Optimierung der urbanen CO₂-Senke Wald begriffen werden. Demnach bietet es sich an, das Pflanzkonzept II „Urbaner Wald“ zu empfehlen und die künftigen Freiflächen mit einer waldartigen Baumdichte (203 BZ/ ha) aufzuforsten. Im Sinne einer wünschenswerten hohen Biodiversität ist eine möglichst hohe Artenvielfalt erstrebenswert. Der heterogene Mischbestand des mittleren Wachstums bietet zwar kurzfristig nicht das größte Potential bis 2025. Langfristig stabilisiert jedoch eine hohe Artenvielfalt das urbane Ökosystem gegenüber den beschriebenen Klimafolgen Trockenheit und Hitzebelastung. Damit wird die CO₂-Senkenleistung unterstützt bzw. bleibt erhalten.

Optimierte Artenwahl nach dem Kriterium Wachstumsverhalten:

Für eine Optimierung des CO₂-Speicherpotentials der Waldstadt-Silberhöhe ist die langfristig angelegte Aufforstung der künftigen Freiflächen mit langlebigen Gehölzen mittleren bis langsamen Wachstums sowie

einer hohen Rohdichte empfehlenswert. Da Laubgehölze (Fachbegriff: Hartholz) im Durchschnitt eine deutlich höhere Rohdichte als Nadelbäume (Fachbegriff: Weichholz) vorweisen (Frommhold 2008: 40), eignen sich bevorzugt sommergrüne Laubbäume, wie *Acer*, *Fraxinus*, *Quercus*, *Fagus* oder *Robinia* für die zukünftigen Aufforstungen in der Waldstadt-Silberhöhe. Der Wirkungseffekt kann verstärkt werden, indem sich die Auswahl der Baumarten an den lokalen Auswirkungen des Klimawandels orientiert. Die Eigenschaften eines geeigneten Stadtbaums: Hitzeverträglichkeit, Trockentoleranz und Winterhärte unter der besonderen Berücksichtigung fremdländischer Arten sichern das jährliche Wachstum und mindern die Mortalitätsrate. Die Klassifizierung nach der KLAM ergibt, dass die bisherige Artenwahl den klimatischen Veränderungen gerecht wird. Dieses Resultat war zu erwarten. Die Stadt- und Landschaftsplanung in Halle muss sich schließlich bei der Artenauswahl von Natur aus nach dem geringen Wasserangebot im mitteldeutschen Trockengebiet richten. Zusätzlich zu den bisherigen Stadtbäumen auch die Pflanzung fremdländischer Baumarten in Betracht gezogen werden. Dies birgt den positiven Wirkungseffekt einer Erhöhung der Biodiversität, wodurch sich das urbane Waldökosystem weniger vulnerabel gegenüber Störgrößen entwickeln kann.

Die Verteilung der Baumarten im Untersuchungsgebiet und deren oberirdische Holzbiomasse deuten auf eine optimale Leistung der Pflanzung schnell wachsender Gattungen hin. Die Lebensdauer der Gehölze endet jedoch nicht im Jahr 2025, sondern deckt lediglich die juvenile Wachstumsphase ab. Der Vorteil des schnellen Wachstums in dem frühen Wachstumsstadium wird im adulten Alter infolge der kürzeren Lebensdauer aufgehoben (McPherson et al. 1999: 5). Ebd. vergleichen die CO₂-Speichereffizienz von Baumarten mit einem geringen Wachstum und dafür einer höheren Lebensdauer mit schnell wachsenden und eher kurzlebigen Spezies. Die in Abb. 9 dargestellten Diagramme der CO₂-Sequestrierung innerhalb von 60 Jahren von *Acer* (sugar maple; Ahorn) und *Populus* (hybrid poplar; Pappel) bestätigen den Einfluss der Lebensdauer und der Wachstumsrate.

Für eine langfristig orientierte CO₂-Speicherung der Waldstadt-Silberhöhe sind demnach langlebige Stadtbaumarten mit einem geringen Pflegebedarf und einem mäßigen bis schnellen Wachstum empfehlenswert (vgl. Nowak et al. 2002b: 118)

Optimierte Artenwahl nach den Kriterien Hitzeverträglichkeit und Trockenheitsresistenz

Ein Bericht des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft befürwortet z.B. für den

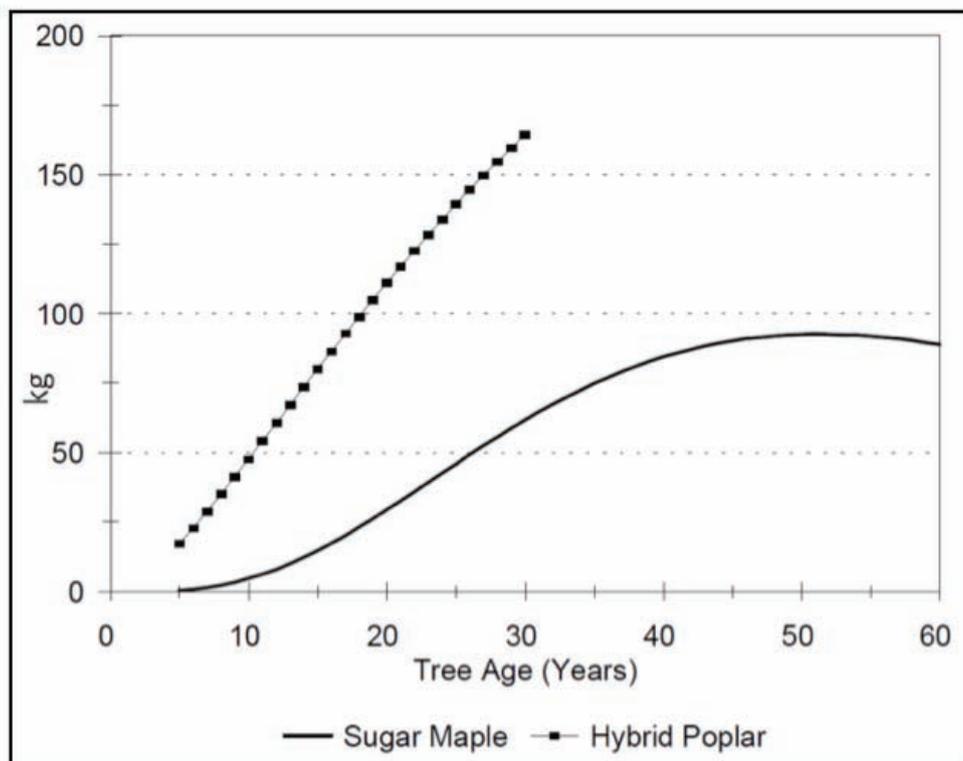


Abb. 9 Jährliche CO₂-Sequestrierung von Acer und Populus in Abhängigkeit der Wachstumsrate und der Lebensdauer (Die Schätzungen basieren auf Wachstumsraten und Biomassegleichungen von Stadtbäumen) (McPherson et al. 1999: 3 nach Frelich 1992 und Pillsbury et al. 1995).

Leipziger Raum einen „adaptierten Trockenwald“ (SMUL: 2005: 68), da künftig besonders die Wasserversorgung der limitierende Faktor des Baumwachstums sein wird. Die vom SMUL empfohlenen Baumarten werden aufgrund der analogen Standortbedingungen im halleschen Stadtteil Silberhöhe für die künftigen Pflanzungen in der Waldstadt ebenfalls befürwortet. In diesem Kontext sollte in Zukunft den trockenheitstoleranten Baumarten *Quercus petraea* und *Quercus rubra*, *Carpinus betulus*, *Tilia cordata* und *Acer platanoides* besondere Beachtung beigemessen werden (ebd.). Die bevorzugte Wahl verschiedener Arten der Gattung *Platanus* im Straßenraum beschreibt die GALK¹¹ mit ihrer hohen Toleranz gegenüber extremen Standorten (Burkhardt et al. 2008: 72). Aus der Studie der KLAM kristallisieren sich besonders Neophyten aus der südeuropäischen Mittelmeerregion oder Asien heraus, die die Kriterien „Trockenheitsresistenz“ und „Winterhärte“ erfüllen und sich für die Einführung in den Stadtraum anbieten.

7. Zusammenfassung

Das zunehmende Potential an Freiflächen eröffnet einer schrumpfenden Stadt neue Chancen für eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Dieser Beitrag zum kommunalen Klimaschutz wurde am Beispiel des Stadtentwicklungskonzeptes „Waldstadt“ für die ehemalige Großwohnsiedlung Halle-Silberhöhe analysiert. Die Stadt- und Bevölkerungsentwicklung fungieren im urbanen CO₂-Kreislauf als Steuerinstrumente während des CO₂-Austauschs zwischen Atmosphäre und Vegetation. Das Integrierte Stadtentwicklungskonzept „Waldstadt-Silberhöhe“ mit dem Leitziel der Aufforstung von Abrissflächen schuf eine zusätzliche Senke in diesem Kreislauf. Deren Wirkung wurde hinsichtlich ihrer Quantität und ihrem Optimierungspotential untersucht.

Die literaturbasierte Recherche nach artspezifischen Gleichungen zeigt eine enorme Vielfalt mit forstlichem Hintergrund. Diese Vielfalt erzeugt aufgrund standortbedingter Einflüsse ein hohes Unsicherheitspotential. Daher wurde in Form von überwiegend generalisierten Gleichungen über die Baumdimension des BHD und dessen allometrischer

¹¹ Arbeitskreis Stadtbäume der ständigen Gartnamtsleiterkonferenz, Empfehlung in der „GALK-Straßenbaumliste“

Regression zur Holzbiomasse die CO₂-Absorption aus der urbanen Atmosphäre abgeleitet.

Während des Wachstumsprozesses der gepflanzten Stadtbäume wird das THG CO₂ aus der städtischen Atmosphäre absorbiert. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt die CO₂-Senke der oberirdischen Holzbiomasse in der Waldstadt-Silberhöhe von etwa 3.000 t im Jahr 2010. Die darin gespeicherten 4.800 t CO₂ entsprechen jedoch lediglich einem marginalen Anteil der jährlichen CO₂-Emission der Einwohner. Dennoch stellt die urbane Vegetation eine CO₂-Senke dar, deren Beitrag zur Reduzierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration optimiert werden kann.

Aus dem Vergleich zwischen den beschriebenen Pflanzalternativen lassen sich verschiedene Orientierungsvorschläge ableiten. Der erste Focus sollte auf die Bestandsdichte gelegt werden. Bis zum Jahr 2025 kann eine Ausdehnung der Baumpflanzung auf weitere 70 ha mit einem dichten Baumbestand von etwa 200 Bäumen pro ha den Klimaschutz um 4 bis 10% verbessern. Ein zweites wichtiges Kriterium stellt die Auswahl geeigneter Arten dar. Ihr Wachstumsverhalten sowie die Lebensdauer entscheiden zusätzlich über die Quantität der verbesserten CO₂-Senkenleistung. Für eine Optimierung des künftigen CO₂-Speicherpotentials ist die langfristig angelegte Aufforstung der künftigen Freiflächen mit langlebigen Gehölzen mittleren bis langsamen Wachstums sowie einer hohen Rohdichte empfehlenswert. Hartholz weist im Durchschnitt eine deutlich höhere Rohdichte auf als Weichholz (Frommhold 2008: 40). Sommergrüne Laubbäume, wie *Acer*, *Fraxinus*, *Quercus*, *Fagus* oder *Robinia* eignen sich also bevorzugt für die zukünftigen Aufforstungen in der Waldstadt-Silberhöhe. Ein gesundes Wachstum sowie eine hohe Biodiversität sichern die Stabilität eines Ökosystems. Der Wirkungseffekt kann verstärkt werden, indem sich die Auswahl der Baumarten an den lokalen Auswirkungen des Klimawandels orientiert. Die Eigenschaften eines geeigneten Stadtbaums: Hitzeverträglichkeit, Trockentoleranz und Winterhärte unter der besonderen Berücksichtigung fremdländischer Arten sichern das jährliche Wachstum und mindern die Mortalitätsrate. Die Klassifizierung nach der KLAM ergibt, dass die bisherige Artenwahl den klimatischen Veränderungen gerecht wird. Dieses Resultat war zu erwarten. Die Stadt- und Landschaftsplanung in Halle muss sich schließlich bei der Artenauswahl von Natur aus nach dem geringen Wasserangebot im mitteldeutschen Trockengebiet richten. Zusätzlich zu den bisherigen Stadtbäumen sollte auch die Einführung wärmeliebender und trockenheitsresistenter Neophyten verstärkt in Betracht gezogen werden. Dies birgt den positiven Wirkungseffekt einer Erhöhung der

Biodiversität, wodurch sich das urbane Waldökosystem weniger vulnerabel gegenüber Störgrößen entwickeln kann. Einen *effektiven* Beitrag zur Stabilisierung der Atmosphäre kann das urbane Ökosystem als globaler CO₂-Hauptemittent jedoch nur leisten, wenn ebenfalls Maßnahmen zur Emissionsreduktion in den Sektoren Verkehr, Bebauungsstruktur, Energieversorgung sowie der Industrie umgesetzt werden.

Dessen ungeachtet bietet die abgestufte Renaturierung der Freiflächen zusätzlich klimaregulierende Dienstleistungen zur Anpassung an die bereits spürbaren Folgen des Klimawandels, wie steigende Temperaturen oder Trockenheit. Die ökosystemaren Dienstleistungen des Kühlungseffekts, der (Fein-) Staubfilterung sowie die Verbesserung hydrologischer und pedogener Verhältnisse tragen einen bedeutenden Teil zum menschlichen Wohlbefinden bei. Die Schätzergebnisse der oberirdischen Holzbiomasse im Verlauf dieser Arbeit und deren aktuelles und zukünftiges CO₂-Speicherpotential bestätigen den Beitrag der Waldstadt-Silberhöhe zum Klimaschutz und einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung.

8. Literaturverzeichnis

- /102/** ARGEBAU - Bauministerkonferenz (2008): Klimaschutz in den Bereichen Bauen, Wohnen und Stadtentwicklung. Vorlage des Ausschusses für Stadtentwicklung, Bau- und Wohnungswesen der Bauministerkonferenz. URL: <http://www.isargebau.de/Dokumente/42310994.pdf>. (24.03.2011)
- /103/** Agenda 21 Treffpunkt (2009): Stromerzeugung und -verteilung. Bruttostromverbrauch pro Kopf 2009. URL: <http://www.agenda21-treffpunkt.de/daten/Strom.htm> (18.08.2011)
- /104/** Bahrenberg, G. / E. Giese / J. Nipper (1999): Univariate und bivariate Statistik, 4. Aufl., Bd. 2, Stuttgart.
- /105/** BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2009): Raumordnungprognose. Bonn.
- /106/** BfN (Bundesamt für Naturschutz) [Hrsg.] (2010): Energieholzanbau auf landwirtschaftlichen Flächen. Auswirkungen von Kurzumtriebsplantagen auf Naturhaushalt, Landschaftsbild und biologische Vielfalt. Anbauanforderungen und Empfehlungen des BfN, Leipzig.
- /107/** Blume, H.P. (1993): Böden. In: Sukupp, H. / R. Wittig [Hrsg.]: Stadtökologie. Stuttgart / Jena / New York, S. 154-171.
- /108/** BMELV (Bundesamt für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) [Hrsg.] (2002): Bundeswaldinventur II. URL: www.bundeswaldinventur.de (27.07.2011)
- /109/** BMU (Bundesministerium für Umweltschutz) [Hrsg.] (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel - vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf (03.08.2011)
- /110/** BMVBS/BBR (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung / Bundesamt für Baum und Raumordnung) [Hrsg.] (2006): 1. Statusbericht. Stadtbau Ost - Stand und Perspektiven. Berlin. URL: http://www.irs-net.de/download/forschung/Erster_Statusbericht_Stadtbau_Ost.pdf

(01.07.2011)

/111/ BMVBS/BBR [Hrsg.] (2008): Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist. Bonn. URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/rog_2008/gesamt.pdf (23. 05.2012)

/112/ BMVBS / BBSR (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung / Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) [Hrsg.] (2009a): Ursachen und Folgen des Klimawandels durch urbane Konzepte begegnen. BBSR-Online-Publikation 22 /2009. URL: http://www.bbsr.bund.de/cln_016/nn_23582/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2009/DL_ON222009,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_ON222009.pdf (26.04.2011)

/113/ BMVBS / BBSR [Hrsg.] (2009b): Klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Wirkfolgen des Klimawandels. BBSR-Online-Publikation 23 /2009. URL: http://www.bbsr.bund.de/nn_495542/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2009/DL_ON232009,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_ON232009.pdf (26.04.2011)

/114/ BMVBS / BBSR [Hrsg.] (2009c): ExWoSt-Studie. Handlungskatalog: „Optionen erneuerbarer Energien im Stadtraum“. Bonn. URL: http://www.bbsr.bund.de/cln_032/nn_23470/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Sonderveroeffentlichungen/2009/DL__handlungskatalog,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL__handlungskatalog.pdf (26.04.2011)

/115/ BMVBS / BBSR [Hrsg.] (2009d): ExWoSt-Studie. Nutzung städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien. Bonn. URL: http://www.nationale-stadtentwicklungspolitik.de/nn_251568/Content/Publikationen/Ressorforschung/erneuerbare_energien,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/erneuerbare_energien.pdf (20.04.2012)

/116/ BMVBS / BBSR [Hrsg.] (2010): Klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Planungspraxis - aktualisierte Fassung der BBSR-Online Publikation, Nr. 25/2009. BMVBS-Online-Publikation 11 /2010. URL: http://www.bbsr.bund.de/cln_016/nn_629248/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2010/DL_ON112010,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_ON112010.pdf (26.04.2011)

/117/ Böhler, S. / U. Jansen / F. Rudolph (2008): Bewertung klimarelevanter Wirkungen von Maßnahmen im Rahmen der Regionale 2010 am Beispiel der Freiraumkonzeptes RegioGrün : Endbericht. Wuppertal Inst. für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal. URL: http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/Endbericht_RegioGruen.pdf (21.07.2010)

/118/ Braeker, O.U. (2008a): Wachstumskurve. URL http://www.wsl.ch/forest/waldman/vorlesung/ww_tk22.ehtml (14.04.2011)

/119/ Braeker, O.U. (2008b): Waldwachstum I/II. Allometrische Funktionen. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Professur Forsteinrichtung und Waldwachstum ETH Zürich. Birmensdorf. URL: http://www.wsl.ch/forest/waldman/vorlesung/ww_tk25.ehtml (17.04.2011)

/120/ Bruse, M. (2003): Stadtgrün und Stadtklima - Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken. In: LÖBF-Mitteilungen, Bd.1, H. 3, Bochum, S. 66-70.

/121/ Bunce, R. (1968): Biomass and Production of Trees in a Mixed Deciduous Woodland. In: Journal of Ecological Nr. 56 / 3, S. 759-775.

/122/ Bundesregierung [Hrsg.] (2001): Initiative der Bundesregierung zur Verbesserung der Stadt- und Wohnungsmarktentwicklung in den neuen Ländern. Programm Stadtbau Ost.

/123/ Burkhardt, I. / R. Dietrich / H. Hoffmann / J. Leschner / K. Lohmann / F. Schoder / A. Schultz (2008): Urbane Wälder. In: BfN [Hrsg.] Naturschutz und Biologische Vielfalt, Bd. 63, Bonn / Bad Godesberg.

/124/ Churkina, G. (2008): Modeling the carbon cycle of urban systems. In: Elsevier Science B.V, Ecological Modelling Nr. 216, S. 107-113.

/125/ Clark, A. / D.R. Phillips / D.J. Frederick (1986): Weight, Volume, and Physical Properties of Major Hardwood Species in the Piedmont. In: USDA Forest Service. Research Paper Nr. 255, Southeastern Forest Experiment Station.

/126/ Fischlin, A. / B. Buchter / L. Matile / K. Ammon / E. Hepperle / J. Leifeld / J. Fuhrer (2003): Bestandsaufnahmen zum Thema Senken in der Schweiz. In: ETHZ (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) [Hrsg.]: Systemökologie ETHZ, H. 29, Zürich.

/127/ Fischlin, A. / B. Buchter / L. Matile (2006): CO₂-Senken und -Quellen der Waldwirtschaft. Anrechnung im Rahmen des Kyoto-Protokolls. In: BAFU (Bundesamt für Umwelt) [Hrsg.]: Umwelt Wissen. Bern.

/128/ Frenzel, K. (2009): Das Potenzial von Straßenbäumen als Kohlenstoffspeicher. Ein Beispiel für die Auswertungsmöglichkeit des Straßenbaumkatasters der Stadt Leipzig. Dipl.-Arb. Institut für Landschaftspflege d. FH für Technik und Wirtschaft. Dresden.

/129/ Frelich, L.E. (1992): Predicting dimensional relationships for Twin Cities shade trees. University of Minnesota, Department of Forest Resources.

/130/ Friedrichs, J. / H. Häussermann (2001): Die Entwicklung der Städte in den neuen Bundesländern. In: Bertram, H. / R. Kollmorgen [Hrsg.]: Die Transformation Ostdeutschlands - Berichte zum sozialen und politischen Wandel in den neuen Bundesländern. Leverkusen.

/131/ Frommhold, H. (2008): Holzkunde. Vorlesungsbegleitende Materialsammlung für das 3. Semester Forstwirtschaft, 2. Aufl., Fachhochschule Eberswalde. Fachbereich Wald und Umwelt. Eberswalde.

/132/ Geiss, S. / J. Kemper / M.T. Krings-Heckemeier (2002): Halle Silberhöhe. In: Deutsches Institut für Urbanistik [Hrsg.]: Die Soziale Stadt. Eine Erste Bilanz des Bund- Länder-

/133/ Programms „Stadtteile mit besonderem Entwicklungsbedarf- die soziale Stadt“. Berlin, S. 126-137. URL: <http://www.sozialestadt.de/veroeffentlichungen/pvo-endberichte/> (18.11.09)

/134/ Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH (HWS): 8.000 Pflänzchen wachsen zu drittem „Energiewald“ in Halle.

/135/ URL: [http://www.hws-halle.de/HWS/Willkommen/HWS Themen/Kurzumtriebsplantagen/](http://www.hws-halle.de/HWS/Willkommen/HWS%20Themen/Kurzumtriebsplantagen/) (17.06.2011)

/136/ Hartmann H. (2002): Biomassebereitstellung und Nutzung. In: Hartmann H. / M. Kaltschmitt [Hrsg.]: Schriftenreihen „Nachwachsende Rohstoffe“, Bd. 3, Biomasse als erneuerbarer

Energieträger. Münster, S. 74-184.

- /137/** Hutyra, L.R. / B. Yoon / M. Alberti (2010): Terrestrial carbon stocks across a gradient of urbanization: A study of the Seattle WA region. In: *Global Change Biologie*. Seattle, S.1-15.
- /138/** IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): 4. Sachstandsbericht des IPCC über Klimaänderungen. Teil I. Wissenschaftliche Grundlagen. Kurzzusammenfassung. In: BMU [Hrsg.]. URL: <http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/38650.php> (10.01.2011)
- /139/** Jenkins, J.C./D.C. Chojnacky / L.S. Heath / R.A. Birdsey (2003): National-Scale Biomass Estimators for United States Tree Species. In: *Forest Science* Nr. 49/1, S. 12-35. URL:http://www.fs.fed.us/ne/newtown_square/publications/other_publishers/OCR/ne_2003jenkins01.pdf (20.04.2010)
- /140/** Jenkins, J.C./D.C. Chojnacky / L.S. Heath / R.A. Birdsey (2004): Comprehensive Database of Diameter-based Biomass Regressions for North American Tree Species. In: USDA Forest Service. General Technical Report NE-319, Delaware. URL: http://www.fs.fed.us/ne/global/pubs/books/dia_biomass/index.html (20.04.2010)
- /141/** Kändler, G. (2009a). Anwendung von Biomassefunktionen am Beispiel der Bundeswaldinventur. In: FVA-einblick. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Jh. 13/ Nr. 2 + 3, S. 14-16.
- /142/** Kordowski, K. (2009): Turbulenter Austausch von Kohlenstoffdioxid in der urbanen Grenzschicht über einer Parkfläche. In: Kuttler W. / B. Sures: *Essener Ökologische Schriften*, Bd. 29, Hohenwarsleben.
- /143/** Larcher, W. (2001): *Ökophysiologie der Pflanzen. Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt*, 6. Aufl., Stuttgart.
- /144/** Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen Anhalt [Hrsg.] (2008): *Digitales Orthofoto Maßstab 1:6000 der Befliegung Halle (Saale) 29.05.2008 (Auflösung 20cm)*. Halle.
- /145/** McHale, M.R. / I.C. Burke / M.A. Lefsky / P.J. Peper / E.G. McPherson (2009): Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? In: *Urban Ecosyst.* Nr. 12, S. 95-113. URL: http://www.fs.fed.us/psw/publications/mcpherson/psw_2009_mcpherson%28mchale%29002.pdf (18.08.2011)
- /146/** McPherson, E.G. (1998): Atmospheric Carbon Dioxide Reduction By Sacramento's Urban Forest. In: *Journal of Arboriculture* Nr. 24/ 4, S. 215-223. URL: <http://joa.isa-arbor.com/request.asp?JournalID=1&ArticleID=2809&Type=2> (18.08.2011)
- /147/** McPherson, E.G. / J.R. Simpson (1999): Carbon Dioxide Reduction through Urban Forestry. Guidelines for Professional and Volunteer Tree Planters. In: USDA Forest Service Technical Report Nr.171, Albany, California. URL:<http://www.psw.fs.fed.us/techpub.html> (12.09.2010)
- /148/** McPherson, E.G. / J.R. Simpson / P.J. Peper / S.E. Maco / Q. Xiau (2005): Municipal forest benefits and costs in five US cities. In: *Journal of Forestry*. Nr. 103/ 8, S. 411- 416. URL: http://www.fs.fed.us/ccrc/topics/urban-forests/docs/jof_Dec_2005.pdf (12. 08.2010)
- /149/** McPherson, E.G. / J.R. Simpson / Q. Xiau / C. Wu (2007): Los Angeles One Million Tree Canopy Cover Assessment. Final Report. URL:http://www.fs.fed.us/psw/programs/uesd/uep/products/psw_cufr689a_MillionTreesLA_final_web.pdf (12. 08.2010)
- /150/** MKULNV (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen) [Hrsg.] (2011): *Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel*. Düsseldorf.
- /151/** URL: http://www.umwelt.nrw.de/klima/pdf/handbuch_stadtklima.pdf (30.06.2011)
- /152/** Muukkonen, P. (2007): Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. In: *Eur. J. Forest Res.*, Vol. 126, S. 157-166.
- /153/** Neubert, U. (2009). Seminar des Deutschen Instituts für Urbanistik (Difu) zum Thema Stadtbau- urbane Qualitäten durch Freiraumentwicklung. Vortrag am 10.11.2009 in Berlin, (unveröffentlicht).
- /154/** Nowak, D.J. (1994): Atmospheric Carbon Dioxide Reduction by Chicago's Urban Forest. In: McPherson E.G. / R.A. Rowntree / D.J. Nowak: *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. Gen. Tech. Rep. NE-186. US Department of Agriculture, Forest Service, S. 83-94. URL: http://www.fs.fed.us/ne/newtown_square/publications/technical_reports/pdfs/scanned/OCR/ne_gtr186a.pdf (15.08.2010)
- /155/** Nowak, D. J. / D. E. Crane (1998): The Urban Forest Effects (UFORE) Model: Quantifying Urban Forest Structure and Functions. In: USDA Forest Service. Northeastern Research Station. Syracuse, NY, S. 714- 720z URL: http://nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_nc212/gtr_nc212_714.pdf (30.11.2010)
- /156/** Nowak, D. J. / D. E. Crane (2002a): Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. In: *Environmental Pollution* (116). Syracuse, NY. S. 381- 389. URL: http://nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2002/ne_2002_nowak_002.pdf (30.11.2010)
- /157/** Nowak, D.J. / J.C. Stevens / S.M. Sisinni / C. Lulay (2002b): Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. In: *Journal of Arboriculture* Nr. 28/ 3, S.113-122. URL: http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2002/ne_2002_nowak_004.pdf. (08.07.2011)
- /158/** Nowak, D.J. / J.T. Walton / J.C. Stevens et al. (2008): Effect of Plot and Sample Size on Timing and Precision of Urban Forest Assessments. In: *Arboriculture and Urban Forestry* Nr.34 / 6, S. 386-390. URL: http://www.ncrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2008/nrs_2008_nowak_003.pdf. (08.07.2011)
- /159/** Nowak, D.J. Ph. D. Project Leader USDA Forest Service, Northern Research Station 5 Moon Library. Syracuse, NY 13210 (2011): Email-Kontakt am 23.02.2011.
- /160/** Oßenbrügge, J. / B. Bechtel (2010): Klimawandel und Stadt. Der Faktor Klima als neue Determinante der Stadtentwicklung. In: Böhner, J. / B.M.W. Ratter [Hrsg.]: *Klimawandel und Klimawirkung. Hamburger Symposium Geographie*, Bd. 2, Hamburg, S. 97-118.
- /161/** Pastor, J. / J.D. Aber / J.M. Melillo (1983): Biomass Prediction Using Generalized Allometric Regressions for Some Northeast Tree Species. In: Elsevier Science. *Forest Ecology and Management* Nr.7 /4, Amsterdam, S. 265-274.
- /162/** Petzold, R. / K.H. Feger / H. Röhle (2010): Standörtliche Voraussetzungen für Kurzumtriebsplantagen. In: Bemann, A.

- / C. Knust [Hrsg.]: AGROWOOD -Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Berlin, S. 44 – 53.
- /163/** Pillsbury N.H / J.L. Reimer / R.P. Thompson (1998): Tree volume equations for fifteen urban species in California. In: Technical Report No. 7. Urban Forest Ecosystems Institute, California's Polytech State. University, San Luis Obsipo.
- /164/** Pohl, R. (Nebenamtliches Mitglied des Grünflächenamtes Halle/ Saale). Telefonat zu den umgesetzten Maßnahmen und Art der Aufforstung in der Waldstadt-Silberhöhe am 23.01.2011.
- /165/** Roloff, A. / S. Bonn / S. Gillner (2008): Baumartenwahl im urbanen Raum unter Aspekten des Klimawandels. Institut für Forstbotanik und Forstzoologie der TU Dresden. Tharandt.
- /166/** URL: <http://www.klimawandelgarten.de/files/vortrag-roloff.pdf> (06.07.2011)
- /167/** Roloff, A. / A. Bärtels / B. Schulz /P. Kiermeier (2006): Flora der Gehölze. Bestimmung, Eigenschaften und Verwendung. 2. Aufl., Stuttgart (Hohenheim).
- /168/** Rowntree, R.A. / D.J. Nowak (1991): Quantifying the Role of the Urban Forests in Removing Atmospheric CO₂. In: Journal of Arboriculture, Nr.17/ 10, S. 269- 275.URL: http://nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/1991/ne_1991_rowntree_001.pdf (18.08.2011)
- /169/** Scholz, V. / B. Boelcke / F. Burger / M. Hoffmann / A. Vetter (2006): KTBL - Datensammlung Energiepflanzen. Merkblatt - Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen. Potsdam / Bornim.
- /170/** Schütt, P. / H. Weisgerber / H..J. Schuck / U.M. Lang / B. Stimm / A. Roloff (2006): Enzyklopädie der Laubbäume. Landsberg/ Lech.
- /171/** SMUL (Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft) [Hrsg.] (2005): Klimawandel in Sachsen. Sachstand und Ausblick 2005. Dresden.
- /172/** Spangenberg, G. (2010): Begründung und Pflege von Kurzumtriebsplantagen. Engen / Welschingen.
- /173/** Stadt Halle (Saale) FB Stadtentwicklung und –planung. [Hrsg.] (2007): ISEK- Integriertes Stadtentwicklungskonzept. Stadtumbaugebiete. Halle, S. 75-89. URL: http://www.halle.de/push.aspx?s=/VeroeffentlichungenBinaries/266/199/br_isek_stadtumbaugebiete_2008.pdf (28.04.2011)
- /174/** Stadt Halle (Saale) [Hrsg.] (2010): Umweltatlas Halle (Saale). URL: http://umweltatlas.halle.de/ua_text.asp?themen=stadtplan_grau&layer=040103 (10.07.2010)
- /175/** Stadt Halle (Saale) [Hrsg.] (2011): Sonderveröffentlichung. Stadtteilkatalog 2010 der Stadt Halle.
- /176/** StaBA (Statistischen Bundesamt Deutschland) [Hrsg.] (2008): Fläche und Bevölkerung nach Ländern und Regierungsbezirken (Stand: 31.12.2006). In: Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden.
- /177/** StaBA [Hrsg.] (2009): Luftemission 2006 nach Produktionsbereichen und Energieträgern (Stand: November 2008). In: Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden.
- /178/** STaLA (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt) [Hrsg.] (2011): Kreisfreie Stadt Halle - Bevölkerungsbewegungen (Stand 31.12.2010). URL: <http://www.statistik.sachsen-anhalt.de/bevoelkerung/bewegungen/index.html> (25.07.2011)
- /179/** Stegemann, A. (2010): Dienstleistungen von Ökosystemen. In: NABU (Naturschutzbund **/180/** Deutschland e.V.) [Hrsg.]: Faltblattreihe Handlungsoptionen. Naturschutz im Klimawandel. Berlin. URL: www.natur-im-klimawandel.de (29.06.2011)
- /181/** Strohbach, M.W. / E. Arnold / D. Haase (2012): The carbon footprint of urban green space - A life cycle approach. In: Landscape and Urban Planning, Vol. 104, S. 220-229.
- /182/** Strohbach, M.W. / D. Haase (2012): Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city. In: Landscape and Urban Planning, Vol. 104, S. 95-104.
- /183/** Strohbach, M.W. / E. Arnold / S. Vollrodt / D. Haase (2011): Carbon sequestration in shrinking cities – potential or a drop in the ocean? In: Rauch, S. / G.M. Morrison (Hrsg.) Urban Environment. S. 61-70.
- /184/** Ter-Mikaelian, M.T./ M.D. Korzukhin (1997): Biomass equations for sixty-five North American tree species. In: Forest Ecology and Management, Vol. 97, S. 1-24.
- /185/** Trendelenburg, R. (1955): Das Holz als Rohstoff, 2. Aufl., München.
- /186/** Vereinte Nationen (1997): Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen.
- /187/** Vollrodt, S. (2011): Das CO₂-Senkenpotential urbaner Gehölze im Kontext postwendezeitlicher Schrumpfungprozesse. Die Waldstadt-Silberhöhe (Halle/ Saale) und deren Beitrag zu einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung. Dipl.-Arbeit. Institut für Geowissenschaften und Geographie. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Halle.
- /188/** Wenk, G. / V. Antanaitis / S. Smelko (1990): Waldertragslehre. Berlin.
- /189/** Whittaker, R.H. / G.M. Woodwell (1968): Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest. In: Journal of Ecology, Vol. 56, New York, S. 1-25.
- /190/** Wittig, R. (1993): Flora und Vegetation. In: Sukupp, H. / R. Wittig [Hrsg.]: Stadtökologie, Stuttgart / Jena / New York, S. 198-235.
- /191/** World Bank (2008): The Global Monitoring Report 2008. Washington.
- /192/** Zianis, D. / P. Muukkonen / R. Mäkipää / M. Mencuccini (2005): Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. In: Silva Fennica . Monographs 4. Tammer - Paino Oy (Finnland). URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/smf/smf004.pdf> (10.08.2010)