

Zeitschrift: Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Schaffhausen
Band: 73 (2021)

Artikel: Stadtökologie
Autor: Capaul, Urs
Kapitel: 4: Die städtische Wärmeinsel (Ursachen, Faktoren, Folgen)
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-880920>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Landschaft	Siedlung (Dorf, Stadt)
Felswände, -spalten, -nischen	Fassaden, Mauerspaltten
Felsrasen auf Felsköpfen	Begrünte kiesige Flachdächer, Mauerkronen
Trockene Höhlen	Estriche, Scheunen
Wintermilde, feuchte Höhlen	Keller, Stollen
Schotter- und Kiesbänke	Bahnschotter, Parkplätze mit Kiesbelägen
Sandbänke	Plattenfugen, Mauerfüsse
Uferanrisse an Prallhängen	Steile Strassenböschungen, Hohlwege
Seen, Weiher, Ufer, Sümpfe	Gartenweiher, Rückhaltebecken, Strassengräben, Pfützen
Wald, Heckensäume an Rändern	Gehölze in Parks, Friedhöfen, artenreiche Lebhäge
Tote Bäume, Baumhöhlen	Dachstühle, Fachwerk, Zaunpfosten
Acker	Zier- und Gemüsegärten
Magerwiesen	Strassen- und Bahnböschungen, Allmenden
Brachland	Gartenbrachen, Bau-Erwartungsland
Fettwiesen	Blumenrasen, Blumenwiesen

Tabelle 2: Landschaft und Siedlung weisen viele ähnliche Lebensräume auf. Sie bilden die Voraussetzung, dass eine angepasste Pflanzen- und Tierwelt auch im Siedlungsraum aufkommen kann. (Quelle: Fredy Leutert, Andreas Winkler, Ulrich Pfändler, BAFU 1995)

4. Die städtische Wärmeinsel (Ursachen, Faktoren, Folgen)

Schon vor mehr als 150 Jahren wies der Schriftsteller Adalbert Stifter darauf hin, dass Städte wärmer als ihr Umland sind. Dies obwohl die Gesamteinstrahlung im Bereich städtischer Ökosysteme um rund ein Fünftel geringer ist als im Freiland; der Grund dafür ist, dass sich die Intensität der Sonneneinstrahlung wegen erhöhter Emissionen von Luftfremdstoffen in Städten reduziert und der Abwärmestrom deutlich erhöht ist. Trotz geringerer Einstrahlung resultiert in städtischen Ökosystemen gegenüber dem Freiland ein Netto-Wärmegewinn. Die Wärmeinsel-Intensität, das heisst die Grösse des

Temperaturunterschieds, korreliert positiv mit der Grösse der Stadt. Konkret: Je grösser die Stadt, desto grösser die Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland. Die Erhöhung der Lufttemperaturen zwischen Stadt und Umland beschränkt sich nicht auf den Sommer, sondern ist für das ganze Jahr gültig. Dieser Wärmeunterschied ist auch in Schaffhausen bemerkbar, wo die Temperaturen in Buchthalen in der Regel 1 bis 2 °C tiefer liegen als im Stadtzentrum. An heissen Sommertagen können die Unterschiede lokal auch spürbar höher sein; ich habe schon 8 °C zwischen Zündelgut und Herrenacker gemessen!

Zahlreiche Faktoren beeinflussen die Umgebungstemperatur:

- Temperaturschichtung der Atmosphäre / Adiabaten
- Höhenlage
- Windeinfluss (Windgeschwindigkeit und Durchlüftung)
- Luftfremdstoffe
- Konzentration an Treibhausgasen
- Versiegelungsgrad
- Verschotterung
- Bebauungsgrad und Bebauungsstruktur
- Grünflächenanteil und -verteilung
- Wasserhaushalt
- Beschattung
- Farbgebung von Gebäuden und Plätzen
- Abwärme (Verbrennungsmotoren, Heizungen, Prozesse etc.)
- Wärmespeicherung

Im Folgenden werden einige dieser Faktoren und ihre Auswirkungen auf die Ökologie näher beleuchtet.

4.1 Temperaturschichtung der Atmosphäre / Adiabaten

Die Atmosphäre besitzt Stockwerke; sie ist geschichtet. Dies hängt mit dem Temperaturverlauf zusammen (Abbildung 5). Die untere Atmosphäre, insbesondere die Troposphäre (Höhen zwischen 7 km in den Polargebieten und 17 km in den Innertropen), ist das Forschungsfeld der Meteorologie; in ihr nimmt die Temperatur mit zunehmender Höhe ab. Darüber liegen die Stratosphäre (bis etwa 50 km Höhe) und daran anschliessend die Mesosphäre (bis

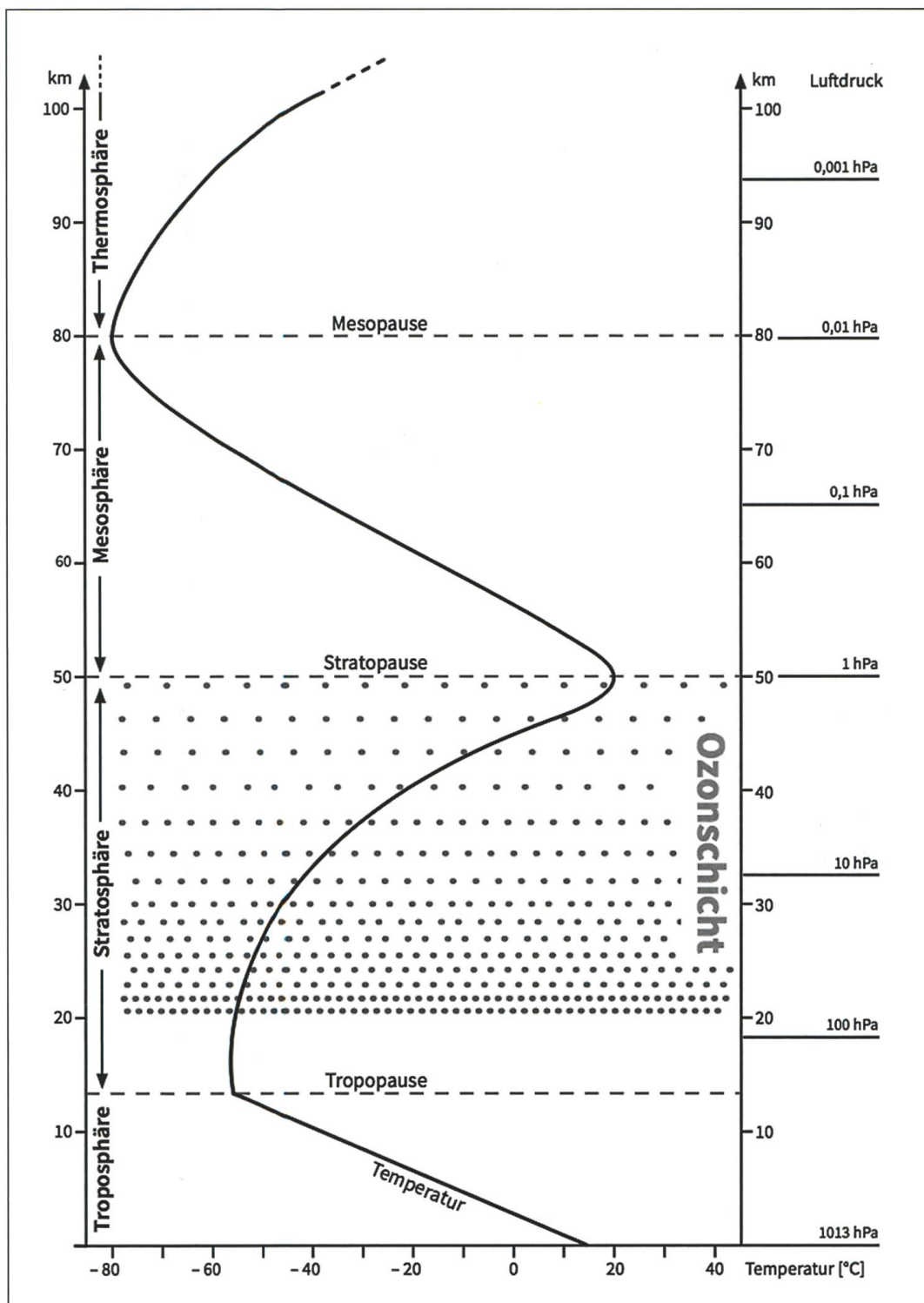


Abb. 5: Die Stockwerke der Atmosphäre sind eine Folge des Temperaturverlaufs (Quelle: <https://herr-kalt.de/geographie/atmosphaere>)

etwa 80 km Höhe), gefolgt von der Thermosphäre (bis etwa 500 km Höhe). In der Stratosphäre befindet sich die Ozonschicht. Ozon selbst ist viel lichtempfindlicher als molekularer Sauerstoff. Es absorbiert UV-C und UV-B und schützt damit Pflanzen, Tiere und Menschen vor Strahlenschäden. Wenn ein Ozon-Molekül ein UV-Photon absorbiert, wird es zwar gespalten, aber in den allermeisten Fällen bildet das freigesetzte Sauerstoff-Atom sofort wieder Ozon. Ozon und seine Bildung bewirken den Temperaturverlauf der Stratosphäre, einerseits über die UV-Absorption, andererseits ist Ozon als gewinkeltes Molekül Infrarot-aktiv und strahlt damit Wärme ab. Daher nimmt die Temperatur in der Stratosphäre bis zur Stratopause zu. Eine Temperaturzunahme mit zunehmender Höhe wird auch als Inversion bezeichnet. Darüber erfolgt eine Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe bis zur Mesopause, und anschliessend steigt die Temperatur aufgrund der Sonneneinstrahlung auf über 1100 °C an.

Die Temperaturänderung in der Troposphäre ohne Verdunstung und Verdampfung von Wasser beträgt ca. 1 °C/100 m Höhenunterschied (= trockenadiabatischer Temperaturgradient). Beim Aufsteigen kommt es zu Abkühlung und beim Absinken zu Erwärmung. Das erklärt die altbekannte Tatsache, dass die Lokaltemperatur höhenabhängig ist.

Steigt jedoch ein wasserhaltiges warmes Luftpaket auf, dehnt es sich aufgrund des niederen Drucks mit zunehmender Höhe aus und kühlt dabei ab. Das Luftpaket steigt solange auf, bis die Innentemperatur der Umgebungstemperatur entspricht. Wird dabei der Taupunkt erreicht, findet eine Kondensation (Wolken- bzw. Nebelbildung) statt. Dabei wird Kondensationswärme freigesetzt. Die höhenabhängige Temperaturabnahme ist daher geringer als bei einem trockenen Luftpaket und beträgt ca. 0,6 °C/100 m (Abbildung 6).

Beides können wir eindrücklich bei einer Föhnlage verfolgen, wenn Winde quer zu den Alpen strömen: auf der Luv-Seite kondensiert Wasser und es fällt Regen (feuchtadiabatischer Aufstieg), auf der Lee-Seite entstehen sich erwärmende und daher trockene Fallwinde (trockenadiabatisch, da das Wasser auf der Luv-Seite bereits ausgegnet hat).

Nur schon aufgrund der Höhenlage ergibt sich zwischen Zündelgut (455 m ü. M.) und Schaffhausen Rhein (391 m ü. M.) eine Temperaturdifferenz von ~ 0,4 bis 0,6 °C; dieser Temperaturunterschied lässt sich daher nicht mit der städtischen Wärmeinsel in Verbindung bringen.

Die atmosphärische Schichtung beeinflusst die Verbreitung der Schadstoff-Emissionen. Die Abgasfahne, der meist sichtbare Teil der Ableitung von Ab-

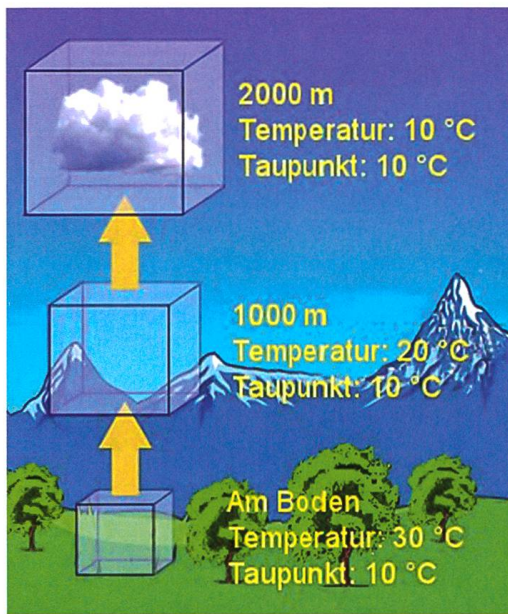


Abb. 6: Aufsteigende Luft dehnt sich aus und kühlt dabei ab. Falls die Umgebungstemperatur den Taupunkt erreicht, kondensiert Wasser und es entstehen Wolken. (Quelle: http://www.gerd-pfeffer.de/dyn_tgradient.html)

gasen über Kaminen in die Atmosphäre, hängt von den baulichen und betrieblichen Bedingungen (z. B. Volumenstrom, Temperatur der Abgase an der Kaminmündung) und den meteorologischen Bedingungen (Windgeschwindigkeit, thermische Schichtung der Atmosphäre) ab. Dabei entstehen verschiedene Formen von Abgasfahnen (Abbildung 7). Oder mit andern Worten, das Bild der Abgasfahne sagt etwas zur effektiven atmosphärischen Schichtung aus. Es ergeben sich fünf Grundtypen von Schichtungen:

- Neutrale Schichtung mit vertikaler Temperaturabnahme, die der Adiabaten weitgehend folgt. Abgasbild = Coning.
- Labile Schichtung mit einer starken vertikalen Temperaturabnahme. Abgasbild = Looping.
- Bodeninversion mit einer Temperaturzunahme ab Boden, was eine sehr stabile Schichtung ergibt. Abgasbild = Fanning.
- Bodeninversion mit einer Temperaturzunahme bis zur Inversionsobergrenze und darüber eine Temperaturabnahme; die Schichtung ist zuerst stabil, anschliessend labil. Abgasbild = Lofting.
- Höheninversion mit einer Temperaturabnahme bis zur Inversionsuntergrenze und darüber eine Temperaturzunahme; die Schichtung unterhalb der Inversionsuntergrenze ist labil, darüber stabil (Hinweis: Dasselbe finden wir zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre). Abgasbild = Fumigation.

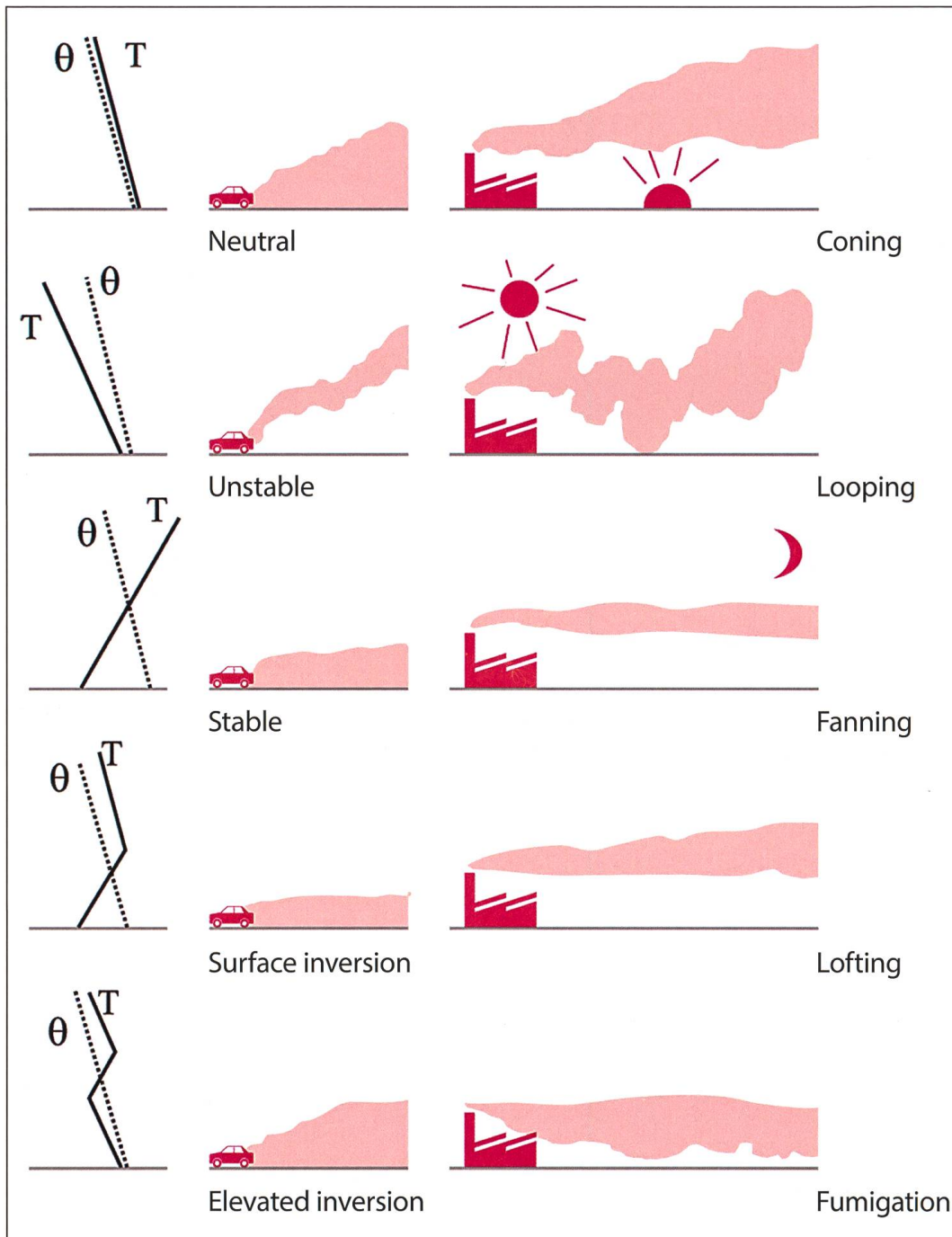


Abb. 7: Abgasbilder in Abhängigkeit von der atmosphärischen Schichtung. T = Temperaturverlauf der Umgebung, θ = Adiabatischer Temperaturgradient.
 (Quelle: Gary Haq, https://www.researchgate.net/figure/Vertical-dispersion-under-various-conditions-for-low-and-high-elevations-of-the-source_fig2_263970547)



Abb. 8: Eine instabile atmosphärische Schichtung ergibt ein mäanderartiges Auf und Ab der Rauchgasfahne. Die Turbulenzen führen zu einer raschen Verdünnung der Rauchgase. Typisch auch die «heruntergezogene» Abgasfahne auf der dem Wind abgewandten Seite des Gebäudes. Dies ist die Folge eines Lee-Wirbels und wird in der Fachwelt als Downwash-Effekt bezeichnet. (Quelle: eigenes Bild; zur Erklärung siehe auch Abbildung 9)

Je nach atmosphärischem Schichtungszustand ergeben sich höhere oder niedrigere Luftschadstoffkonzentrationen. Beim Coning (siehe Abbildung 7) ist die Verteilung der Luftschadstoffe sehr gleichmässig. Die Konzentrationen hängen stark von der Emissionshöhe ab. Dieser Ausbreitungstyp kommt insbesondere tagsüber bei mässigen und hohen Windgeschwindigkeiten vor.

Beim Looping entsteht aufgrund der atmosphärischen Turbulenzen eine gute Luftdurchmischung, und die Schadstoffkonzentrationen bleiben vergleichsweise gering. Dieser Ausbreitungstyp kommt tagsüber bei Sonneneinstrahlung und vergleichsweise niedrigen Windgeschwindigkeiten vor.

Nahezu überhaupt keine Durchmischung findet beim Ausbreitungstyp Fanning statt. Die Atmosphäre ist stabil geschichtet, und daher gibt es kaum eine vertikale Erstreckung der Schadstofffahne; aber die Schadstoffe können über grosse Distanzen verbreitet werden. Bei hohen Kaminen bleibt die bodennahe Belastung mit Schadstoffen gering.

Neben diesen Grundformen unterscheidet man ferner noch zwei Mischformen von Ausbreitungstypen: Lofting und Fumigation. In beiden Fällen muss unterschieden werden, ob die Emissionshöhe unter- oder oberhalb der Temperaturinversion liegt. Liegt die Quelle unter der Inversionsuntergrenze, werden hohe Konzentrationen erwartet, da die Inversion wie eine Sperrschicht wirkt. Liegt die Emissionsquelle oberhalb der Inversionsobergrenze, sorgt diese dafür, dass Schadstoffe nicht an den Boden gelangen können.

Die Kenntnis der Schadstoffausbreitung sollte in der Stadtplanung berücksichtigt werden, so wie es der Energierichtplan der Stadt Schaffhausen vorschlägt: Stark emittierende Anlagen wie grosse Holzfeuerungen sollen nicht im Luv, sondern im Lee der Stadt (im Osten) platziert werden.

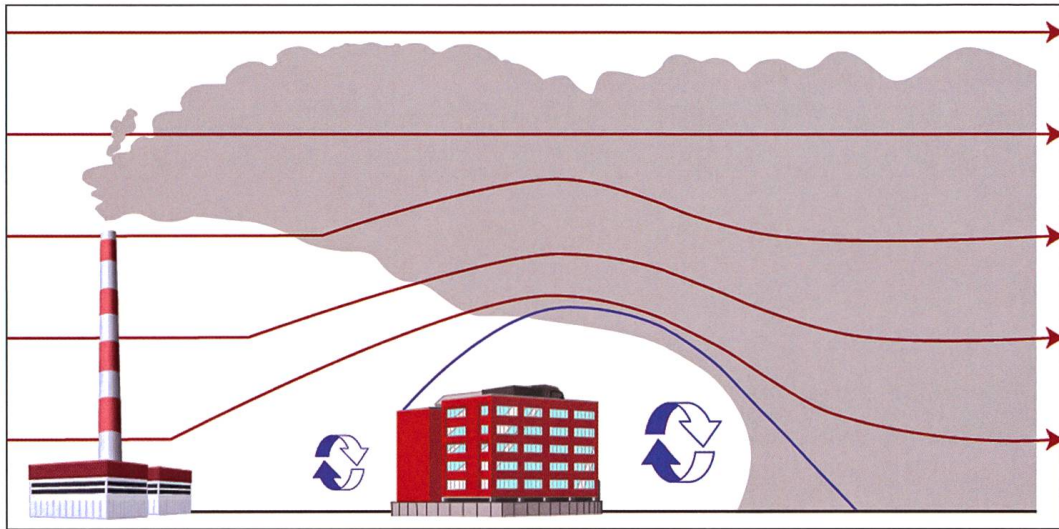


Abb. 9: Luftwirbel auf der Hinterseite des Gebäudes können zu einem Downwash-Effekt und daher zu einer erhöhten Verschmutzung führen. Lösung: Es ist ein ausreichender Abstand zwischen Emittent und Gebäude einzuplanen oder der Kamin ist zu erhöhen.
(Quelle: <https://www.ontario.ca/document/guideline-11-air-dispersion-modelling-guideline-ontario/model-input-data-geographical-information-inputs>)

4.2 Einfluss des Windes

In der 500 bis 1000 Meter mächtigen untersten Luftschicht (atmosphärische oder planetare Grenzschicht) wird die geostrophe Strömung (d. h. der ungestörte, laminare Wind in oberen Luftschichten) durch Reibung an der Erdoberfläche gebremst. Das resultierende Höhenprofil der Winde ist abhängig von der Rauigkeit der Oberfläche.

Ein besonderes Merkmal der Stadt ist die Veränderung der Windverhältnisse sowohl hinsichtlich der Windrichtung als auch der Windgeschwindigkeit (vgl. Städtebauliche Klimafibel, Baden-Württemberg 2012). Die grössere Oberfläche und Rauigkeit einer städtischen Bebauung bewirkt aufgrund der erhöhten Reibung eine Verminderung der Windgeschwindigkeit. Diese kann im Jahresmittel bis zu 30% niedriger sein. Insbesondere nimmt die Häufigkeit von Windstillen um bis zu 20% zu. Dadurch entsteht ein reduzierter Luftaustausch, begleitet von einem verminderten Schadstoffabtransport; es können lokal erhöhte Schadstoffkonzentrationen entstehen. In Abbildung 10 kommt zum Ausdruck, dass sich die vertikalen Windprofile über der Innenstadt, dem Stadtrand und dem Freiland stark unterscheiden. Neben der Abnahme der Windgeschwindigkeit zum Stadtzentrum hin erkennt man auch

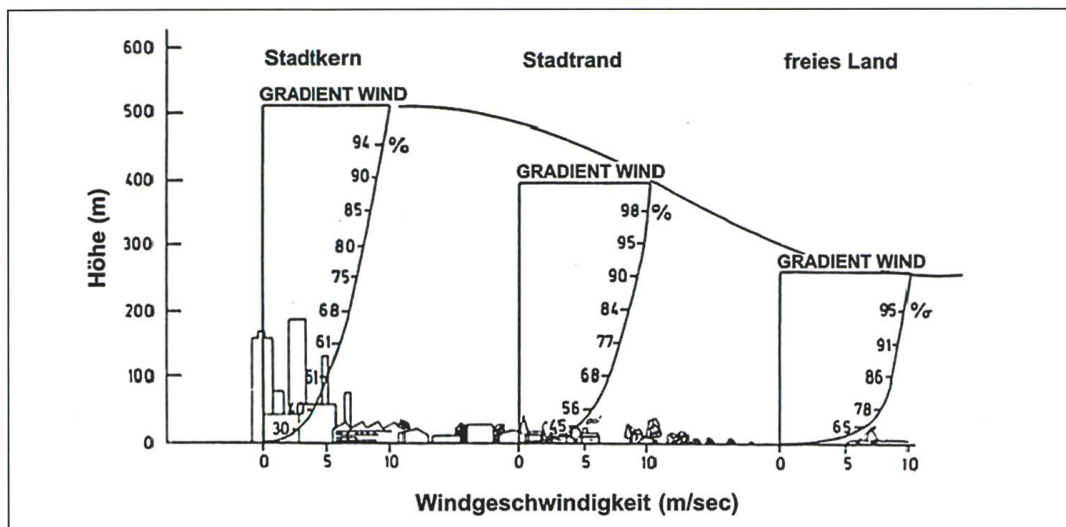


Abb. 10: Schematische Darstellung des vertikalen Windprofils über Innenstadt, Stadtrand und Freiland. In der 500 bis 1000 Meter mächtigen untersten Luftschicht, auch atmosphärische Grenzschicht genannt, wird die geostrophische Strömung (= ungestörte, laminare Windgeschwindigkeit in oberen Luftschichten, die Windgeschwindigkeit erreicht 100 %) durch Reibung an der Erdoberfläche gebremst. Über einer Stadt ist die Rauigkeit erhöht, und daher liegt die geostrophische Strömung über einer Stadt höher als im freien Umland. (Quelle: Klimafibel Baden-Württemberg, S. 34 ff.).

die im Stadtkern höher reichende Störung des Windfeldes. Jedoch kann in der Stadt die Böigkeit durch Wirbelbildung (Front- und Leewirbel) an hohen Gebäuden zunehmen.

Von Bedeutung für die Luftbewegung in Stadtgebieten können auch lokale Windsysteme sein, die sich insbesondere bei schwachem überregionalem Wind ausbilden. Es handelt sich in der Regel um schwache Winde. Doch auch Schwachwinde tragen zum Schadstoffabtransport sowie zur Frischluftzufuhr bei. Man unterscheidet zwischen topographisch und durch Bebauung bedingten Windsystemen. Erstere, zu denen Hangwinde sowie Berg- und Talwinde gehören, sind stark durch das vorhandene Relief geprägt. Daneben gibt es bodennahe Kaltluftabflüsse, deren Ausprägung abhängig ist von der Größe der Kaltluft produzierenden Flächen (zum Beispiel Äcker, Wiesen) im Umland der Städte sowie von der Hangneigung. Die Kaltluftflüsse sind vor allem gravimetrisch bedingt (kalte Luft ist schwerer als warme Luft); sie entstehen vor allem nachts.

Wenn Kaltluftentstehungsgebiete im Einzugsbereich der Täler liegen, die zur Siedlung führen, sind damit die natürlichen Bahnen der Zufuhr frischer Kaltluft vorgegeben, da die kühlere Luft bodennah stets zu den tieferen Stellen des Geländes fließt. Dies ist in Schaffhausen der Fall, wo Täler (Rhein-,

Durach-, Fulachtal) das Zentrum fingerförmig erschliessen. Die Intensität dieser Frischluftzufuhr hängt von der Grösse des Einzugsgebietes, der Hangneigung, der Weite der Täler und der Hindernisfreiheit ab. Hindernisse für den Kaltluftfluss können sein: Talverengungen, Dämme, Lärmschutzwälle oder -wände, Baumriegel quer zum Talverlauf, insbesondere aber Verbauungen durch grössere Gebäude oder gar geschlossene Siedlungskörper. An Hindernissen staut sich die Kaltluft mit stark absinkenden Temperaturen und vermindertem Luftaustausch im Bereich vor und hinter dem Hindernis (Abbildung 11). Dadurch erhöht sich die Gefahr von Früh- und Spätfrost, und in den Tälern findet eine verstärkte Nebelbildung statt (siehe auch: Luft, Neujaahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, Nr. 64/2012 S. 57 ff). Gleichzeitig führt die Verminderung der Frischluftzufuhr zu einer Erhöhung der innerstädtischen Temperatur (Verstärkung des Wärmeinsel-Effekts) und zu einer reduzierten Schadstoffabfuhr.

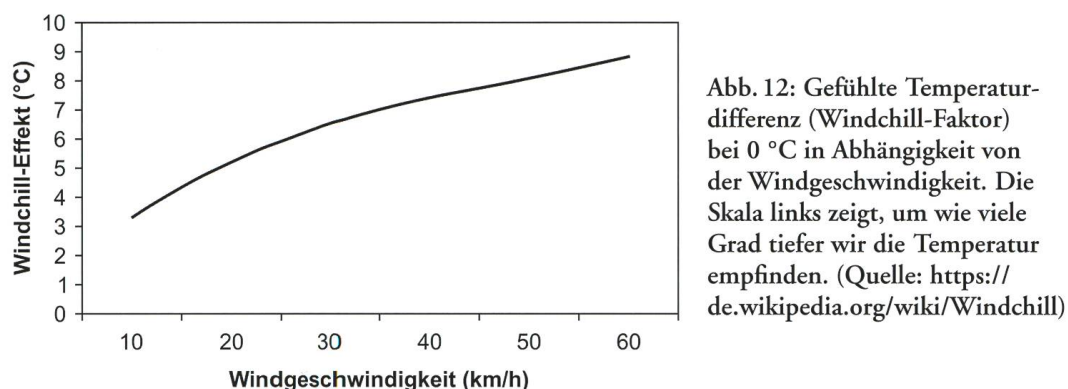


Abb. 11: Einfluss der randlichen Bebauung auf die Frischluftzufuhr von Stadtzentren (Quelle: C.L. Krause, 2006)

Die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Behaglichkeit der Menschen. Wir alle kennen das, dass man an einer zugigen Ecke relativ stark friert, obwohl es gemäss Thermometer gar nicht so kalt ist. Dieser Effekt hängt mit der Wärmebilanz unseres Körpers zusammen. Ist die Lufttemperatur unterhalb der Körpertemperatur, so gibt unser Körper Wärmeenergie an die Umgebung ab. Der Wind bläst die dünne, warme und feuchte Luftschicht über unserer Haut weg. Die neue Luftschicht ist kälter und trockener und nimmt daher das von der Haut verdunstete Wasser auf, was auf der Haut zu Verdunstungs-

kälte führt. Diese Wärmeabgabe verstärkt sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Als besonders unangenehm empfindet der Mensch die Wind-Abkühlung bei einer Umgebungstemperatur von ca. 10 °C und tiefer.

Aus diesem Grunde gibt es die sogenannten Windchill-Kurven oder -Tabellen, welche die gefühlte Temperatur bei vorgegebener Windgeschwindigkeit angeben. Der Windchill (engl. für Windkühle bzw. Windfrösteln) beschreibt folglich den Unterschied zwischen der gemessenen Lufttemperatur und der gefühlten Temperatur in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit: je höher die Windgeschwindigkeit, desto mehr frösteln wir (Abbildung 12).



In einem zunehmend wärmeren Klima kann somit der Windgeschwindigkeit und der Frischluftzufuhr eine wichtige Rolle zufallen, damit die Innenstädte weiterhin lebenswert bleiben. Der folgende Vergleich zeigt, dass locker bebaute Vororte gegenüber dichten Zentren in einem wärmeren Klima bezüglich Windeffekten Vorteile besitzen:

	Buchthalen	Innenstadt
Bebauungsdichte	locker	dicht
Durchlüftung	gut	schlechter (Strassenschluchten)
Windgeschwindigkeit	höher	geringer
Windchill-Effekt	höher	geringer
Schadstoff-Abfuhr/-Verdünnung	besser	geringer

Tabelle 3: Vergleich zwischen Buchthalen (Vorort) und Schaffhausen Innenstadt (Zentrum) bezüglich Windeinflüssen. Eine mangelhafte Wärmeabfuhr durch Winde kann in Innenstädten zu hohen Temperaturen führen und die Behaglichkeit stark beeinträchtigen. Die städtischen Durchlüftungen müssen daher planerisch geschützt werden, vor allem wenn aus raumplanerischer Sicht die Verdichtung gefördert werden soll.

4.3 Einfluss der Luftfremdstoffe (Emissionen)

Gemäss Weltgesundheitsorganisation WHO liegt eine Luftverunreinigung vor, wenn Stoffe oder Stoffgemische in Konzentrationen in der Aussenluft vorkommen, welche für Mensch, Tier, Pflanzen oder Eigentum störend oder schädlich sind oder zur Schädigung beitragen.

Zu den natürlichen Luftverunreinigungen zählen gemäss Definition der WHO etwa:

- die Pollen von Blütenpflanzen, welche Allergien hervorrufen können;
- Kohlenwasserstoff-Emissionen von Pflanzen (z. B. Terpene von Nadelbäumen, Botenstoffe zwischen Individuen, pflanzliche Duftstoffe in Form von ätherischen Ölen, usw.), welche zum photochemischen Smog beitragen;
- Methan aus Mooren, Binnengewässern oder aufgetauten Permafrostböden;
- Staub- und Gasemissionen von Vulkanen.

Quellen der menschlichen Luftverunreinigung sind industrielle oder gewerbliche Produktionsprozesse, die Energiewirtschaft, die Haushalte und der Verkehr. Bei Verbrennungsprozessen werden gasförmige, flüssige oder feste Stoffe an die Atmosphäre abgegeben. Während windschwachen Wetterlagen oder bei Inversionslagen können sich Luftschadstoffe anreichern, was oft mit einer Sichttrübung einhergeht. Die Sichttrübung ist unter anderem bedingt durch die Zunahme an Partikeln und Aerosolen im Laufe der Inversionslage. Dieser Zustand wird als Smog bezeichnet. Inversionen entstehen,

- falls sich eine hohe wärmere Luftschicht über eine bodennahe kalte Schicht (Tal- oder Kessellagen) oder eine kalte unter eine wärmere Luftschicht schiebt (Höheninversionen);
- falls sich der Boden schneller abkühlt als die darüber liegende Luftmasse (Bodeninversion); dies tritt bei windarmen und wolkenlosen Bedingungen auf.

Weil sich dabei das Temperaturgefälle in der Atmosphäre umkehrt, kommen aufwärts gerichtete warme Luftströmungen zum Erliegen, so dass die Schadstoffe nicht mehr abtransportiert werden: Eine Sperrschicht entsteht, unter der sich Aerosole, Partikel und Abgase anreichern.

Dank kantonaler und städtischer Massnahmenpläne Luftreinhaltung sind extreme Smog-Lagen in der Schweiz selten geworden. Doch punktuell können immer wieder hohe Ozon- und Feinstaubkonzentrationen auftreten, die

der Gesundheit abträglich sind. Aber in «Megacities» (Agglomerationen mit einer Bevölkerung von mehr als zehn Millionen) können nach wie vor besorgniserregende Luftschadstoff-Konzentrationen auftreten, mit extremen Ozonspitzenwerten in den Abluftfahnen (Abbildung 13).



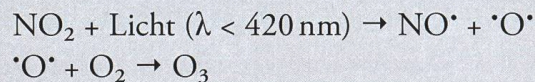
Abb. 13: Zwei Aufnahmen von Peking im August 2005: Das linke Foto entstand nach zweitägigem Regen, das rechte Foto zeigt denselben Ort an einen Sonnentag (Quelle: Johannes Stähelin, Professor für Ozonchemie, ETH Zürich, <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2014/09/bodennahe-ozon-smog-verursachender-luftschadstoff.html>)

Die Luftfremdstoffe werden über verschiedene Prozesse aus der Atmosphäre entfernt. Einerseits über eine trockene Deposition, andererseits über eine nasse Deposition mit Regen (Ausregnen, Auswaschen), Schnee oder Hagel. Die Deposition ist ein komplexer, aus vielen Einzelmechanismen bestehender Vorgang. Grössere Partikel und Tropfen folgen der Schwerkraft und sedimentieren. Kleinere schwebende Partikel werden mit den Turbulenzen der Luftströmungen auf Oberflächen abgelagert (Impaktion) oder folgen einer Diffusion. Gase werden an feuchten Oberflächen gelöst oder von trockenen Oberflächen adsorbiert. Eine Besonderheit der nassen Deposition stellt die Interzeptionsdeposition dar. Dies ist die Stofffracht, welche von Pflanzenteilen (Blätter, Nadeln, Äste) aufgenommen wird. Auch in Trockenperioden oder bei Nebelereignissen kämmen die Pflanzenteile Luftfremdstoffe aus der Atmosphäre. Bei Niederschlagsereignissen können die zuvor trocken deponierten Stoffe wieder abgewaschen werden.

Einschub: Als Sommersmog (auch photochemischer Smog, Ozonsmog oder Los Angeles-Smog) bezeichnet man die Luftbelastung durch hohe Konzentrationen von Ozon und anderen Photooxidantien. Dabei ist das Wort Smog ein Zusammenzug der englischen Wörter Smoke (Rauch) und Fog (Nebel).

Der photochemische Smog tritt bei sonnigem Wetter auf und entsteht aus Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen in Verbindung mit der UV-Strahlung der Sonne. Bodennahes Ozon greift die Atmungsorgane an und schädigt Pflanzen und Tiere. Zudem gibt es im Infrarot-Bereich Strahlungswärme (siehe Kapitel 4.1) ab und ist damit ebenfalls ein sehr potentes Treibhausgas.

Das bodennahe Ozon entsteht unter Mitwirkung von Stickstoffoxiden und wird durch die Sonnenstrahlung beeinflusst. Stickstoffdioxid wird durch UV-Strahlung in Stickstoffmonoxid und ein Sauerstoffatom gespalten. Dieser atomare Sauerstoff verbindet sich mit einem Sauerstoff-Molekül zu Ozon:



Die Bildung von Ozon wird ausserdem durch Kohlenwasserstoffe begünstigt, da diese unter Sonneneinwirkung Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid umwandeln. Ozon kann tagsüber durch NO_2 teilweise wieder abgebaut, aber auch mit Winden in den ländlichen Raum verlagert werden. Im ländlichen Raum können wegen den tieferen NO_2 -Konzentrationen daher die Ozon-Konzentrationen höher sein als in der Stadt.

Das eigentliche Waschmittel der Atmosphäre ist aber das Hydroxyl-Radikal (OH^\bullet), ein Molekül mit einem freien Elektron, welches daher sehr reaktiv ist und in der Atmosphäre Kettenreaktionen auslöst. Es entsteht in der Troposphäre insbesondere aus Ozon und Wassermolekülen beim Auftreffen von UV-Strahlen und spielt eine wichtige Rolle beim Sommersmog und für den Abbau vieler Spurengase. Stoffe wie Stickstoffdioxid werden zu Salpetersäure, chlorhaltige Stoffe zu Salzsäure, Schwefeldioxid zu Schwefliger oder Schwefelsäure oxidiert. Diese Säuren lösen sich in Wasser und werden ausgegnet (Saurer Regen). Hauptursache für den Sauren Regen ist die Luftverschmutzung. Aber auch in der Umgebung von aktiven Vulkanen kommt es zu sauren Niederschlägen. Saurer Regen schädigt Natur, Umwelt sowie menschliche Infrastrukturanlagen.

Viele Luftfremdstoffe tragen direkt oder indirekt zur Wärmespeicherung in der Atmosphäre (Treibhauseffekt) und damit auch zur städtischen Wärmeinsel bei. Diese sogenannten Treibhausgase sind gasförmige Bestandteile der Atmosphäre, welche die Wärmestrahlung absorbieren, die von der Erdoberfläche, den Wolken und der Atmosphäre selbst abgestrahlt wird. Die Treibhausgase strahlen die Wärme sowohl Richtung Weltall als auch zurück in Richtung Erdoberfläche ab, sodass die untere Atmosphäre zusätzlich erwärmt wird. Treibhausgase stammen sowohl aus natürlichen als auch aus menschlichen Quellen. Entsprechend unterscheidet man den natürlichen vom anthropogenen (vom Menschen verursachten) Treibhauseffekt. Das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre ist Wasserdampf, dessen Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt zwei- bis dreimal so hoch wie der von Kohlendioxid CO_2 ist. Ohne den natürlichen Schutzschild läge die globale Temperatur bei -18°C . Der natürliche Treibhauseffekt sorgt dafür, dass auf der Erde eine mittlere Temperatur von 15°C herrscht.

Der anthropogene Treibhauseffekt entsteht aufgrund von menschlichen Emissionen, insbesondere Kohlendioxid. Dies geschieht hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Erdöl, Erdgas oder Kohle, aber auch durch die Rodung von Wäldern. Neben dem zusätzlichen Kohlendioxid werden zusätzliche Spurengase und künstlich hergestellte Stoffe freigesetzt. Deren Treibhauswirkung kann um ein Vielfaches potenter als diejenige des CO_2 -Moleküls sein. Einige Beispiele von Treibhausgasen sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Treibhausgas	Treibhauspotenzial	Verweilzeit in der Atmosphäre	Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt
Kohlendioxid CO_2	1	bis 120 Jahre	50%
Methan CH_4	25	9 bis 15 Jahre	20%
Lachgas N_2O	298	110 bis 120 Jahre	6 bis 9%
FCKW	14 000–17 000	65–110 Jahre	10%
Ozon O_3	2000	Tage bis Monate	8%
Schwefelhexafluorid SF_6	22 800	3200 Jahre	ca. 0,03%
Stickstofftrifluorid NF_3	17 200	740 Jahre	sehr klein

Tabelle 4: Treibhausgase gemäss Kyoto-Protokoll. (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhausgas#Kohlenstoffdioxid>)

Eine nicht zu vernachlässigende Rolle kommt Russ-Emissionen zu. Diese dunklen Partikel entstehen vor allem in Dieselmotoren oder beim Verbrennen von Holz und Kohle. Zwar werden sie nicht zu den Treibhausgasen gezählt, haben aber ebenfalls Einfluss auf die globale Erwärmung. Sie wirken direkt durch Absorption und Reflexion von Solarstrahlung und indirekt, indem sie als Kondensationskeime zur Wolkenbildung beitragen und die Wolkeneigenschaften ändern. Russpartikel führen auf hellen Flächen wie Schnee zu einer Absenkung der Albedo (= Mass für das Rückstrahlvermögen) und damit zu einer Erwärmung sowie einem beschleunigten Abschmelzen von Schnee- oder Eisflächen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bestimmte Stoffe nicht nur die Gesundheit der Lebewesen beeinträchtigen können, sondern ebenso zur Klimaerwärmung beitragen. Da die Luftfremdstoffe über Städten gegenüber dem Umland deutlich erhöht sind, tragen sie auch zur städtischen Wärmeinsel bei. Die Emissionen sind daher unabhängig von der Einhaltung der Grenzwerte weiter zu reduzieren. Dies dürfte in Zukunft über eine zunehmende Elektrifizierung geschehen.



Abb. 14: Die Stadt Schaffhausen setzt bei ihrem Busverkehr auf Batterie. In den nächsten zehn Jahren wird die gesamte Dieselbusflotte der Verkehrsbetriebe Schaffhausen (VBSH) durch Elektrobusse ersetzt. Die Stimmberechtigten haben dem entsprechenden Kredit für die «Einführung von Elektrobusen mit Schnellladesystem» über rund 58 Millionen Franken mit rund 54 % Ja-Anteil deutlich zugestimmt. (Quelle: Stadt Schaffhausen)

Einschub: Elektromobilität ist mehr als nur das Ersetzen eines Verbrennungsmotors durch einen Batterieantrieb. Der Umstieg auf Elektromobilität eröffnet die Chance, die Emissionen drastisch zu reduzieren und über neue Fahrzeugkonzepte und Mobilitätsformen nachzudenken. Dazu gehört zum Beispiel die Möglichkeit zur individuellen Ladung, unabhängig von Tankstellen zu Hause oder am Arbeitsplatz, oder die Einführung anderer Nutzungskonzepte wie Carsharing. Mit Carsharing und mit einer guten Elektrobus-Erschliessung kann autoarmes Wohnen gefördert werden. Auch im Güterverkehr können neue Transportkonzepte die Umweltbelastung reduzieren, indem längere Transporte per Zug und die regionale Verteilung mit Elektrolastwagen erfolgen. Die tägliche innerstädtische Mobilität kann mit Elektro-Bikes auch im topographisch schwierigen Gelände, wie es zum Beispiel die Stadt Schaffhausen aufweist, abgedeckt werden. Mit einer Zunahme der Elektromobilität dürfte die Eigenstromversorgung mit Photovoltaik zunehmen. Neue Überbauungen wie zum Beispiel beim Wagenareal oder Hohberg richten sich auf die Elektromobilität aus. Neuere Lebenszyklus-Analysen des Paul-Scherrer-Instituts PSI belegen eindrücklich die Vorteile der Elektromobilität gegenüber andern Antriebssystemen, selbst wenn die Emissionen nicht nur für den Betrieb, sondern auch für die Herstellung berücksichtigt werden (Werte fürs Jahr 2018). Die Umstellung auf Elektromobilität ist zur Reduktion des Treibhauseffekts zwingend notwendig.

• Benzin	293,7 CO ₂ -Äquivalente pro Kilometer
• Diesel	233,8 CO ₂ -Äquivalente pro Kilometer
• Erdgas	199,4 CO ₂ -Äquivalente pro Kilometer
• Brennstoffzelle	186,6 CO ₂ -Äquivalente pro Kilometer
• Elektro	122,2 CO ₂ -Äquivalente pro Kilometer

4.4 Einfluss des städtischen Grüns

Die Bedeutung der Pflanzen zur Verminderung des städtischen Wärmeinselleffekts und zur Verbesserung der Luftqualität ist enorm. Sie spenden nicht nur Schatten, sondern erzeugen durch die Verdunstung von Wasser (Transpiration) Verdunstungskälte und tragen zu einer Abkühlung der Umgebung bei. Bedeutsam ist auch die Fähigkeit der Pflanzen, Luftfremdstoffe aus der Luft zu kämmen. Messungen haben ergeben, dass 50–80% Filterwirkung keine Seltenheit sind (Klaus Adam, 1988 S. 77).



Abb. 15: Kräutergarten im Museum zu Allerheiligen mit begrünter Efeufassade. Im Kräutergarten werden die verschiedenen Strategien gezeigt, die Pflanzen zur Fassadenbegrünung einsetzen. Selbstklimmer können mittels Haftwurzeln (Efeu) oder Haftscheiben (Selbstkletternde Jungfernrebe) ausreichend raue flächige Unterlagen erklettern, indem sie sich daran anheften. Andere Pflanzen benötigen ein Gerüst, an dem sie sich hochwinden (z.B. Hopfen) oder mit Ranken festhalten (Weinrebe). Eine andere Strategie verfolgen die Spreizklimmer, die mit Hilfe langer, sparriger Triebe emporklettern; zur Unterstützung der Fixierung haben Spreizklimmer oft kräftige Stacheln oder Dornen (z.B. Kletterrosen). (Quelle: eigenes Bild)

Eine gesunde Buche verdunstet pro Tag bis zu 500 Liter Wasser. Dafür entzieht sie ihrer Umgebung rund 350 kWh Wärme. Es verwundert daher nicht, dass ein mächtiger Laubbaum seine direkte Umgebung klimatisch beeinflusst. Die klimaregulierende Wirkung von Grünflächen ist unter anderem abhängig von der Ausdehnung der Grünfläche und ihrer Struktur. Ein artenarmer, kurzgeschnittener Zierrasen hat nicht annähernd die Wirkung einer baumbestanden, artenreichen Wiese (z. B. Streuobstwiese). Der Boden des Zierrasens trocknet zudem schneller aus und muss an heißen Sommertagen bewässert werden. Spürbare Verbesserungen des Mikroklimas schaffen auch begrünte Fassaden. Im Sommer werden die Hauswände weniger stark erhitzt und strahlen dadurch weniger Wärme ab auf Innenhöfe oder Strassen, im Winter bilden sie auf den Wetterseiten ein windabschirmendes, wärmedämmendes Luftblatt-Polster (bei immergrünen Pflanzen wie Efeu, Abbildung 15).

Über Grünflächen ist es feuchter und kühler als über Beton oder Asphalt. Das merken alle, die an einem sommerlichen Sonnentag barfuss über Asphalt oder einen Rasen laufen. Die Grünflächen beeinflussen somit nicht nur das Stadtklima, sondern auch kleinräumig das Mikroklima (Abbildung 16).

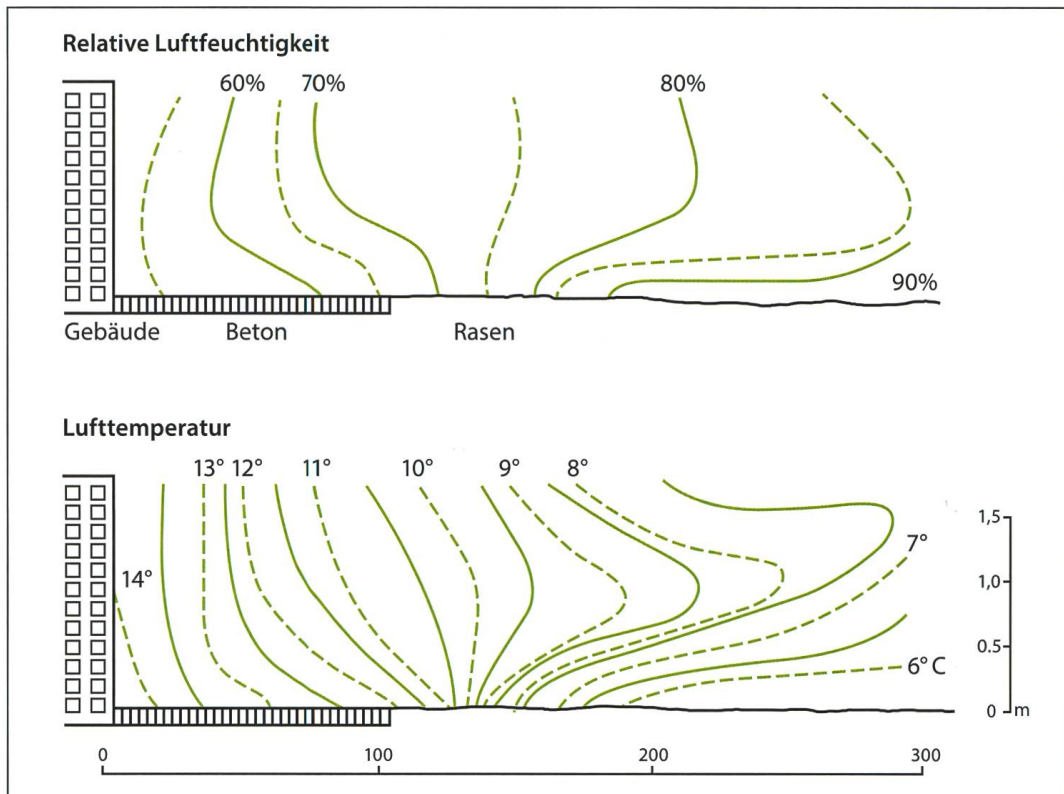


Abb. 16: Mikroklima über einem Rasen und über Beton. Je nach Bedeckung ändern sich die Lufttemperatur (unten) und die relative Luftfeuchtigkeit (oben) kleinräumig. Der Einfluss der begrünten Fläche ist augenfällig: 8 °C Temperaturdifferenz zum Messzeitpunkt. Grünflächen schaffen erhebliche Aufenthaltsqualitäten und reduzieren den Wärmeinseleffekt in einer Stadt. (Quelle: Klaus Adam, 1988)

Die beschattende und kühlende Wirkung von Pflanzen wird in neuen städtischen Quartieren (z. B. Zürich Nord) bewusst eingesetzt und grüne Oasen in Form von öffentlich zugänglichen Parkanlagen geschaffen. Andere Städte planen im Kampf gegen die zunehmend heisseren Sommer, versiegelte Flächen aufzubrechen und zu begrünen. Selbst kleine Flächen wie Hinterhöfe eignen sich dazu, sofern sie von der Parkierung befreit sind. Ein Kiesweg als Zufahrt hilft im Gegensatz zu einer asphaltierten Fläche, dass das Wasser



Abb. 17: Interessante naturnahe Umgebungsgestaltung in einer neueren Siedlung in Schaffhausen (Bild links). Südlich direkt angrenzend eine grosse Fläche mit Kanadischen Goldruten (Bild rechts). Diese Goldruten bilden aufgrund der riesigen Samenmenge eine dauernde Gefahr für die naturnahen Flächen. (Quelle: eigene Aufnahmen)

versickern kann. Eine abwechslungsreiche Bepflanzung mit Blumen in verschiedenen Farben, Kräutern, Büschen und Bäumen erfreut das Auge und sorgt für eine Blütenpracht über mehrere Monate. Bereits kleine begrünte Randflächen zeigen günstige Effekte. Einheimische Gewächse ziehen Schmetterlinge und Bienen sowie viele verschiedene Vögel an, die Begrünung wirkt als Filter für Luftschadstoffe und sorgt für ein angenehmes Klima im Innenhof. Ein gestalteter Innenhof bedeutet eine Aufwertung der Immobilie und einen Raum zum Rückzug und zur Entschleunigung. Da das neue Raumplanungsgesetz eine Verdichtung nach innen verlangt, sind ausreichend Freiflächen und Grünräume einzuplanen, damit die Lebensqualität in der Stadt nicht leidet (Abbildung 17). Leider sind gegenteilige Tendenzen auszumachen: Die Verschotterung von ehemaligen Grünflächen, Vorgärten oder auch

öffentlichen Arealen hat in letzter Zeit erheblich zugenommen. Diese Schottergärten bedeuten eine ökologische und ästhetische Verarmung und verstärken die Sommerhitze in den Siedlungsgebieten. Hinter der Verschotterung steht der Wunsch, einen unterhaltsarmen Garten zu erhalten. Aber auch Schottergärten müssen mit einigem Aufwand gehegt und gewartet werden, ansonsten verbreiten sich schnell unerwünschte Pflanzen wie etwa die invasiven Kanadischen Goldruten.

4.5 Einfluss der Flächenversiegelung

Ein hoher Anteil der Siedlungsflächen ist bebaut, asphaltiert oder anderweitig verfestigt (Abbildung 18). Damit tragen diese Flächen nichts zum Versickerungsprozess bzw. zur Grundwasseranreicherung bei, und auch der Gasaustausch des Bodens mit der Atmosphäre ist stark gedrosselt. Das Wasser wird rasch über die Kanalisation (Mischsystem) via Kläranlage oder über separate Meteorwasserleitungen (Trennsystem) direkt in den Vorfluter abgeleitet. In der Schweiz ist bereits mehr als ein Drittel der städtischen Gebiete an das «getrennte» Kanalisationsnetz angeschlossen – innerhalb Europas ist es das am weitesten entwickelte System. Es wird im Zuge der Kanalisationserneuerung und der Neubauten erweitert. Während bei versiegelten Flächen sich die Verdunstung auf die Zeit unmittelbar nach den Niederschlägen beschränkt und daher kaum etwas zur Kühlung beiträgt, tritt in den Freiflächen eine kontinuierliche Verdunstung auf, bei welcher eine Abkühlung eintritt. Demgegenüber erhitzen sich befestigte Flächen schneller und geben auch nachts gespeicherte Wärme ab. Die Flächenversiegelung ist eine der Hauptursachen für die städtische Wärmeinsel.

Wo immer möglich sollte Meteorwasser jedoch über eine biologisch aktive Bodenschicht versickert werden. Denn auch Niederschlagswasser kann mit Schmutzpartikeln (Atmosphäre) und Schwermetallen (z.B. Zink oder Kupfer von Dachrinnen) verunreinigt sein.

Bei Starkniederschlägen, deren Häufigkeit aufgrund des Klimawandels zunimmt, kann die Kanalisation oder der Vorfluter (Bäche, Flüsse) die oberflächlich abfließenden Wassermassen nicht mehr ausreichend fassen, und es kommt zu örtlichen Überschwemmungen. Deshalb werden Rückhaltedämme und Rückhaltebecken gebaut, um Kanalisation und Gewässer nicht zu überlasten. Modellberechnungen belegen, dass die heutige Kanalisation jedoch aufgrund der Versiegelung an die Kapazitätsgrenzen stösst. So dürfte

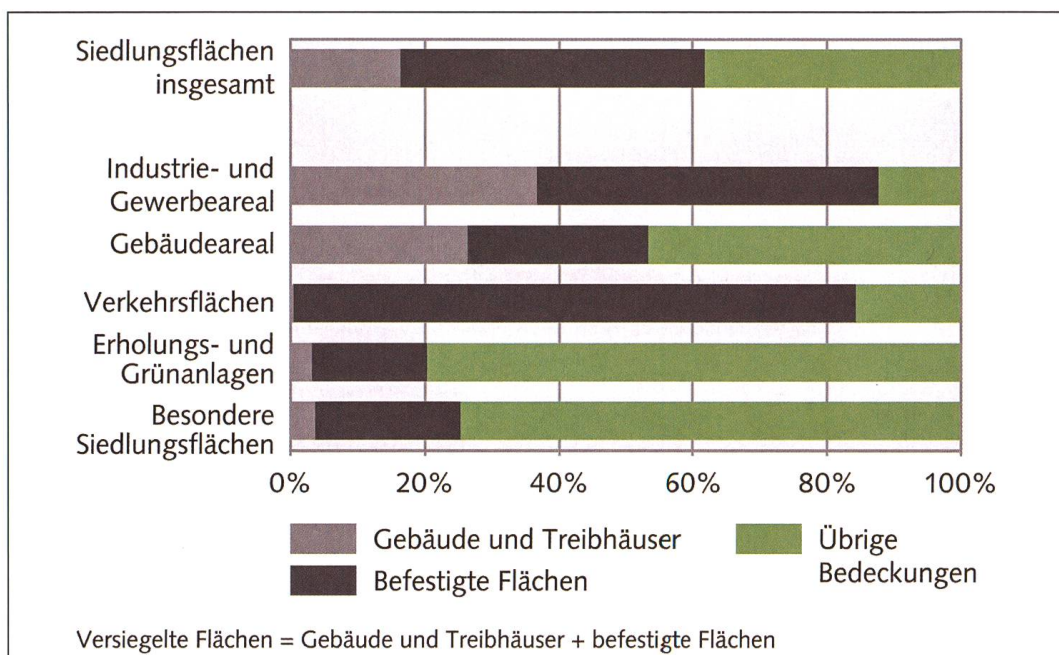


Abb. 18: Versiegelungsgrad der Siedlungsflächen in der Schweiz, gemäss Arealstatistik 2009. Unter die Kategorie «Besondere Siedlungsflächen» fallen beispielsweise Deponien, Baustellen oder Energieversorgungsanlagen. Die Siedlungsflächen sind im Mittel zu über 60% versiegelt. Die Siedlungsflächen bedecken 7,5% der Fläche der Schweiz. Im Mittelland ist ihr Anteil mit 16,0% mehr als doppelt so gross wie im Landesdurchschnitt, in den Alpenregionen liegt er deutlich darunter. Seit den 1980er Jahren stellt das Bundesamt für Statistik mit der Arealstatistik Daten über den Zustand und die Veränderung der Bodennutzung der Schweiz bereit. Damit bildet die Arealstatistik ein unverzichtbares Instrument der räumlichen Langzeitbeobachtung. Dank ihrer Ergebnisse lässt sich beurteilen, inwiefern die Entwicklung der Bodennutzung in der Schweiz mit den Zielen der Raumentwicklung und des häushälterischen Umgangs mit der Ressource Boden übereinstimmt. (Quelle: Bundesamt für Statistik BFS)

bei der eingedolten Fulach im Güterbahnhofareal bei einem lokalen Starkniederschlag (100-jähriges Ereignis) über den Gebieten Niklausen und Weinberg bereits ein erheblicher Wasseraustritt erfolgen. Unvergessen ist der Starkniederschlag vom 2. Mai 2013, als in Schaffhausen zahlreiche Strassen überschwemmt wurden und viele Keller mit Wasser vollliefen (Abbildung 19). Neuere Untersuchungen (Blöschl et al., 2020) über die letzten 500 Jahre belegen, dass die europäischen Flüsse in den letzten Jahrzehnten recht häufig über die Ufer traten und diese Periode zur hochwasserreichsten Epoche gehört. Die aktuell starke Hochwasserphase hat zudem eine neue Qualität: Früher traten Überschwemmungen gehäuft in der kühlen Jahreszeit auf, 41% der mitteleuropäischen Überschwemmungen geschahen im Sommerhalbjahr. Heute entfallen 55% aufs Sommerhalbjahr. Die Verschiebungen hängen un-

ter anderem mit häufigeren Starkniederschlägen sowie mit einer Änderung von Verdunstung und Schneeschmelze zusammen. Selbstverständlich fördern die steigenden Flächenversiegelungen die Überschwemmungshäufigkeit zusätzlich.

Eine Bodenversiegelung ist nur schwer und mit hohen Kosten wieder zu beseitigen. Im Anschluss an eine Entsiegelung bleibt die natürliche Struktur des Bodens gestört. Häufig bleiben Reste von Fremdstoffen (wie Beton- oder Asphaltbrocken, Kunststoffsplitter oder diverse Schadstoffe) im Boden zurück. Eine neue Bodenfauna bildet sich nur über längere Zeiträume, sodass auch die natürliche Bodenfruchtbarkeit verzögert und oft nicht in der vorherigen Qualität wieder herstellbar ist.



Abb. 19: Am 2. Mai 2013 um etwa 18:30 Uhr setzte vor allem in der Stadt Schaffhausen, in Neuhausen und im oberen Reiat ein sintflutartiger Regen ein. Innert kürzester Zeit sammelten sich enorme Wassermengen an, welche sich ihre eigenen Wege suchten und nicht mehr von der normalen Kanalisation geschluckt werden konnten. Der Herblingerbach floss durch Herblingen bis zur damaligen Kantonsstrasse J15 (heute A4). Zudem trat auch die Durach im Mühlental über die Ufer. (Quelle: <http://www.schaffhausen.net/2013/05/schaffhausen-unter-wasser-uberschwemmung.html>)

Einschub: Marc Battaglia erstellte im Rahmen seiner Masterarbeit 1999 an der Universität Zürich eine Wasserbilanz für die Stadt Schaffhausen (exkl. Hemmental). Im Jahresmittel fielen im Zeitraum 1978 bis 1997 insgesamt 1016 mm Niederschlag (1 mm = 1 Liter pro Quadratmeter). Diesen Niederschlag verglich er mit der Verdunstung, dem Oberflächenabfluss und der Versickerung. Die Versickerung ist als Grundwasserspeisung zu verstehen. Es handelt sich um eine Momentaufnahme aus dem Jahr 1997, die jedoch belegt, dass dank dem Walddreichtum sowie den vielen Landwirtschafts- und Gartenflächen eine Grundwasserspeisung stattfindet.

Nutzungsart	Fläche	Niederschlag	Verdunstung	Oberflächenabfluss	Versickerung
	(in ha)	(in mm)	(in mm)	(in mm)	(in mm)
Siedlung befestigt inkl. Verkehrsflächen	496	1016	152	767	97
Siedlung begrünt inkl. Verkehrsbegleitgrün	441	1016	463	83	470
Wald	1467				
– Anteil Nadelholz	695	1016	821	16	179
– Anteil Laubholz	772	1016	690	26	300
Wiesen, Hackfrüchte	304	1016	712	24	280
Getreide, Mais	334	1016	332	55	629
Rebberge	5	1016	712	46	258
Unproduktive Vegetation	16	1016	463	44	509
Gewässer	42				
– Rhein	34	1016	508	508	0
– Bäche	3	1016	508	254	254
– stehende Gewässer	5	1016		0	508
TOTAL	3105	1016	561	159	296

Der Hauptanteil des Niederschlags verdunstet (561 mm), ein weiterer Teil verlässt den Bilanzierungsraum mit den Oberflächengewässern (159 mm), der Rest versickert (296 mm). Die verdunstete Wassermenge ist bei grossräumiger Betrachtung auch Teil des zukünftigen Niederschlags. Würden die Grünflächen als Gedankenspiel versiegelt, ergäbe sich eine deutliche Reduktion der Niederschlagsmenge und somit ein wesentlich trockeneres Klima.

4.6 Einfluss der Farbgebung

In den heissen Mittelmeerregionen fallen die oft weiss getünchten Gebäude auf. Helle Gebäude erhitzen sich weniger schnell als dunkle (Abbildung 20). Im Hochsommer kann ein bordeauxroter Anstrich in der Sonne heisser als 80 °C werden, während sich die Temperatur einer gelben Fassade um die 65 °C bewegt. Dunkle Farben fördern damit den städtischen Wärmeinseleffekt. Zu den negativen Auswirkungen der Hitze auf die verschiedenen Bauelemente der Fassaden kommt hinzu, dass eine dunkle Fassadenfarbe auch grössere Temperaturunterschiede erleidet, wenn eine Wolke vor die Sonne tritt: Die sich daraus ergebenden Spannungen begünstigen Schäden am Verputz. Die Erwärmung ist besonders ausgeprägt auf den isolierten Aussenfassaden, die zusammengesetzt sind aus zum Beispiel einem rosa Verputz auf einer zwanzig Zentimeter dicken Styroporisolation. Die Wärmedämmung dieses Dämmmaterials ist sehr gut: Sie verringert den Wärmetransport zu den Mauern so stark, dass sich die Schicht der Farbe viel stärker erwärmt, als wenn der Putz direkt auf den Beton oder die Mauern aufgetragen worden wäre (<https://www.energie-umwelt.ch>).

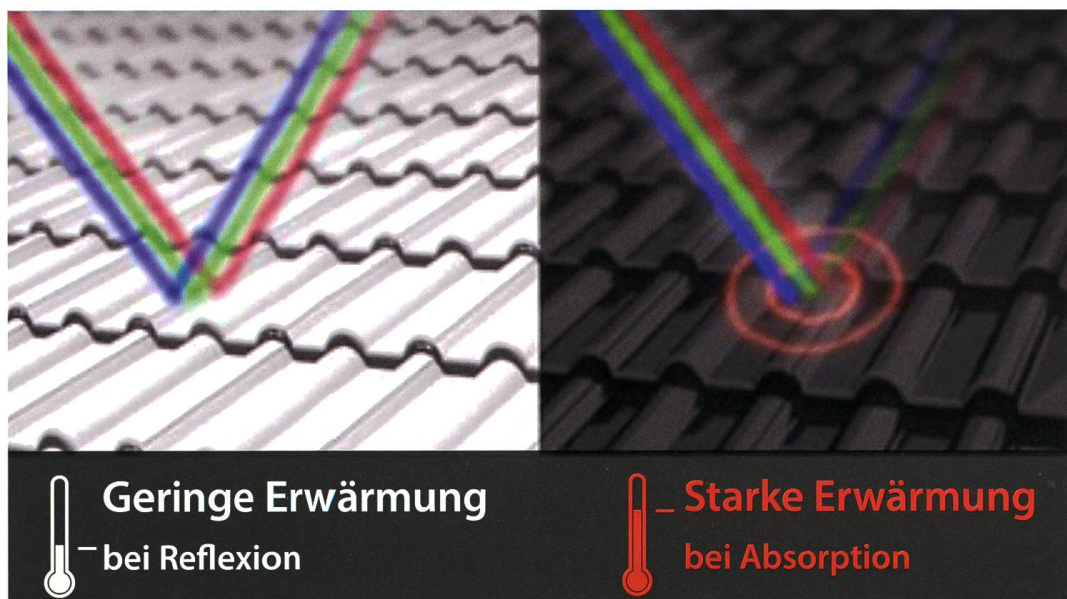


Abb. 20: Die Gebäudeerwärmung ist geringer, wenn die solare Einstrahlung durch helle Farben teilweise reflektiert wird, während dunkle Farben die Strahlung vermehrt absorbieren und dadurch zu einer starken Erwärmung beitragen. Bei zunehmend heisseren Sommern als Folge des Klimawandels muss die Farbgebung zukünftig vermehrt beachtet und optimiert werden. (Quelle: <https://www.baulinks.de/webplugin/2012/1219.php4>)

Als Schutz vor Hitze eignen sich stark reflektierende Farben wie Weiss. Sie sind für die Aussenverwendung gedacht und reflektieren idealerweise einen grossen Teil des sichtbaren wie auch des unsichtbaren Sonnenlichts. Sie verringern die Erwärmung der sonnenexponierten Gegenstände und Gebäudeelemente: Dächer, Tanks für Wasser- oder Treibstoffreserven, Garten- und Terrassenmöbel, Autokarosserien, Schienenstränge etc. Im besten Fall kann die Temperatur eines hell gestrichenen Gegenstands oder Gebäudeelements in der Grössenordnung von 15–20% verringert werden. Was im Sommer von Vorteil ist, verkehrt sich im Winter aber zum Nachteil, weil dann eine gewisse Wärmeabsorption erwünscht wäre. Deshalb ist Weiss eher für nicht isolierte Gebäude in warmen Klimazonen gedacht, wo die eingesparte Energie für Klimaanlagen grösser ist als die Kosten für die zusätzliche Heizenergie, die durch diese Anstriche entstehen.

Ein nachhaltiger, qualitativ hochstehender Anstrich sollte verschiedene Anforderungen erfüllen: Die Farben sollten möglichst hell, effizient, strapazierfähig, dauerhaft und ästhetisch sein und gleichzeitig wenig schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt haben (ohne flüchtige organische Verbindungen (VOC), ohne gefährliche Schwermetalle als Farbpigmente).

5. Anpassungen der Vegetation an die städtische Umwelt

Die Stadt bietet für Pflanzen ein enges Mosaik verschiedener Lebensräume, die durch Wasserangebot, Temperatur, unterschiedliche Bodengüte, Verkehrsdichte und Immissionen charakterisiert sind. Dabei ist zwischen spontan ansiedelnden und angepflanzten Gewächsen zu unterscheiden. Wildwachsende Pflanzen können sich in der Stadt nur dort behaupten, wo sie nicht bewusst zurückgedrängt werden (Abbrennen, Herbizide, Jäten, Wintersalzung). Die angepflanzten Gewächse stellen die Hauptbiomasse von Pflanzen in Städten dar. Sie werden primär als Zier- und Nutzpflanzen angebaut. Ökologische Anliegen wie die Förderung der Artenvielfalt sind meistens eine untergeordnete Zielsetzung; im Vordergrund stehen Anliegen wie attraktive Blüte, Abstandsgrün, Sichtschutz (Abbildung 21).