

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

Artikel: Stadtökologie
Autor: Capaul, Urs
Kapitel: 2: Eine Pyramide steht Kopf
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>

erhöhte Einwohnerdichten gegenüber ländlichen Regionen charakterisiert. Eine Stadt darf nicht mit den Bebauungen von staatenbildenden Tieren verwechselt werden. Sie ist kein Bienenstock oder Ameisenbau, welche instinktgetrieben und evolutiv entstanden sind. Ein solches, eher starres Naturell kann sich bei plötzlich auftretenden Umweltveränderungen nicht ausreichend rasch anpassen und wird dadurch tiefgreifend gestört. Die menschliche Stadt hingegen ist nicht perfekt an die Lebensweise des Menschen angepasst. Beispielsweise trägt sie dem Wunsch nach Abschirmung gegen Wohnnachbarn oder den Klimabedürfnissen nicht optimal Rechnung (Günter Fellenberg, 1991 S. 10). Vielmehr sind die Städte gekennzeichnet durch eine dynamische Anpassungsfähigkeit an sich ändernde zukünftige Erfordernisse.

Für Pflanzen und Tiere stellen Städte ein vielfältiges Mosaik von unterschiedlichsten Lebensräumen dar. Ganz typisch ist zum Beispiel die Trittpflanzengesellschaft, ein Vegetationstyp, der gekennzeichnet ist durch meist niedrigwüchsige, lichtbedürftige und eher konkurrenzschwache Pflanzen. Sie können entweder Tritt vertragen oder sind so kleinwüchsig, dass sie den Tritt vermeiden können, oder sie besitzen «selbstheilende» Mechanismen.

2. Eine Pyramide steht Kopf

Nahrungsketten sind Kreisläufe zwischen Produzenten, Konsumenten und Reduzenten.

Die Produzenten sind Organismen, die energiereiche Biomasse aus anorganischen Verbindungen (Kohlendioxid und Wasser) gewinnen und dabei Sonnenenergie mittels Photosynthese chemisch binden; es sind zumeist Pflanzen. Den produzierten Zucker verwenden sie in der Zellatmung als Energiequelle für den weiteren Aufbaustoffwechsel. Bei diesem werden komplexere Bestandteile der Biomasse gebildet, also hauptsächlich Proteine, Fette und Nukleotide. Hierzu nehmen sie weitere chemische Verbindungen wie Phosphat, Nitrat oder Sulfat auf.

Die Primärkonsumenten (Herbivore, Fructivore) fressen die Produzenten oder deren Produkte (Früchte, Blätter usw.). Sekundärkonsumenten (Carnivore) wiederum ernähren sich von den Primärkonsumenten oder von den Reduzenten. Der Endkonsument bildet das Ende einer Nahrungskette. Der Mensch kann sich sowohl pflanzlich als auch mit Fleisch oder mit Pilzen oder Pilzmycel (zum Beispiel Quorn) ernähren.

Reduzenten sind Organismen, welche die abgestorbene organische Substanz letztlich mineralisieren oder teilweise in Bodenhumus umwandeln. Dazu gehören Schnecken, Milben, Springschwänze, Regenwürmer, Asseln, Pilze, Bodenbakterien und viele mehr. Sie sorgen dafür, dass sich organische Abfälle nicht immer mehr auftürmen und dass der Boden seine Struktur und Fruchtbarkeit erhält.

Die Fähigkeit der Produzenten zur Photosynthese ist die Basis für jedes Ökosystem. Die Photosynthese ist die wohl wichtigste Errungenschaft, die das Leben jemals hervorgebracht hat. Sowohl die Primärproduzenten als auch die heterotrophen Konsumenten sind auf die thermodynamisch wertvolle freie Energie (= Exergie) angewiesen. Der Energiefluss im Ökosystem zeigt sich in der Weitergabe der chemischen Energie von Ernährungsstufe zu Ernährungsstufe. Auf jeder Stufe (Produzenten, Konsumenten, Reduzenten) wird Energie zur Aufrechterhaltung der Stoff- und Energiewechselprozesse benötigt. Die gespeicherte chemische Energie nimmt bis zum Endkonsumenten hin ab. Letztlich wird die im Ökosystem chemisch gespeicherte Sonnenstrahlung wieder als (im thermodynamischen Sinn «wertlose») Wärme abgegeben; mit andern Worten: die Entropie nimmt zu. Die stetige Zufuhr von Sonnenenergie ist deshalb für die Funktion eines Ökosystems absolut notwendig.

Einschub: *Energie ist eine fundamentale physikalische Grösse, die in der Physik sowie in der Technik, Chemie, Biologie und der Wirtschaft eine zentrale Rolle spielt. In einem gegenüber der Umgebung abgeschlossenen System ändert sich die Gesamtenergie nicht (Energieerhaltungssatz); sie kann aber ihre Erscheinungsform ändern. Zum Beispiel kann Bewegungsenergie im System Turbine/Generator in elektrische Energie und Abwärme umgewandelt werden. Wenn aus einem schlecht isolierten Rohr Wärme in die Umgebung abfliesst, kann dieser Energieanteil nicht mehr genutzt werden, um Arbeit zu verrichten. Sie wird als Anergie bezeichnet. Jener Anteil der thermischen Energie, welcher technische Arbeit leistet und folglich direkt nutzbar ist, heisst Exergie. Energie ist somit die Summe von Anergie und Exergie.*

Im Gegensatz zu den Stoffen gibt es in einem Ökosystem keinen Kreislauf der Energie, sondern einen Energiefluss. Das wird deutlich, wenn man die Nahrungsmengen der verschiedenen Ernährungsstufen einer Nahrungskette bzw. eines Nahrungsnetzes berechnet und grafisch darstellt. Die grafischen Darstellungen weisen bei Lebensgemeinschaften auf dem Lande in der Regel eine Pyramidenform auf. Wegen dieser Pyramidenform wird die Darstellung der Stoffmassen als Nahrungspyramide (oder Biomassenpyramide) bezeichnet. Jede Ernährungsstufe dieser Pyramide stellt dabei die Nahrung für die nächst höhere Stufe dar.

Unter Biomasse verstehen die Ökologen die momentane Masse (Gewicht) der lebenden Organismen in jeder Ernährungsstufe. Sie wird in Masseneinheiten, bezogen auf bestimmte Flächen (z. B. kg pro m²) oder bei Gewässern auf bestimmte Rauminhalte (z. B. kg pro m³), angegeben. Die breite Basis der Nahrungspyramide stellt die Biomasse der Pflanzen dar. Pflanzen sind die Produzenten. Diese Biomasse ist die Nahrungsgrundlage für eine geringere Masse von Konsumenten 1. Ordnung (Primärkonsumenten, Pflanzenfresser).

Die in der pflanzlichen Biomasse enthaltenen Nährstoffe und die enthaltene Energie werden von den Primärkonsumenten (Pflanzenfresser) zur Aufrechterhaltung des Lebens (Wachstum, Entwicklung, Fortpflanzung, Atmungsprozesse) benötigt. Ein Teil der in den Nährstoffen enthaltenen chemischen Energie wird dabei in Wärme umgewandelt und an die Umwelt abgegeben. Der durch die Lebensprozesse der Primärkonsumenten verbrauchte Anteil an Biomasse und Energie steht der nachfolgenden Ernährungsstufe, den Sekundärkonsumenten (Fleischfresser), nicht mehr zur Verfügung. Von Ernährungsstufe zu Ernährungsstufe der Pyramide nimmt so die jeweils verfügbare Biomasse und damit die darin enthaltene Energie ab. Die Nahrungspyramide verdeutlicht die stetige Abnahme sowohl der Biomasse und damit der in ihr enthaltenen Energie als auch der Individuenanzahl von den Primärproduzenten bis hin zu den Endkonsumenten (Abbildung 1). Gleichzeitig nimmt die Grösse der Individuen tendenziell zu.

Selbstverständlich handelt es sich dabei um ein sehr vereinfachtes Modell. Zum Beispiel kann ein Fuchs in derselben Nacht sowohl als Primärkonsument (wenn er Kirschen frisst), als Sekundärkonsument (wenn er Mäuse fängt) und als Endkonsument (wenn er ein Wiesel schlägt) unterwegs sein. Auch sind die Zerlegerorganismen (Destruenten oder Reduzenten) nicht berücksichtigt, die im gesamten Stoffkreislauf jedoch eine enorme Bedeutung haben.

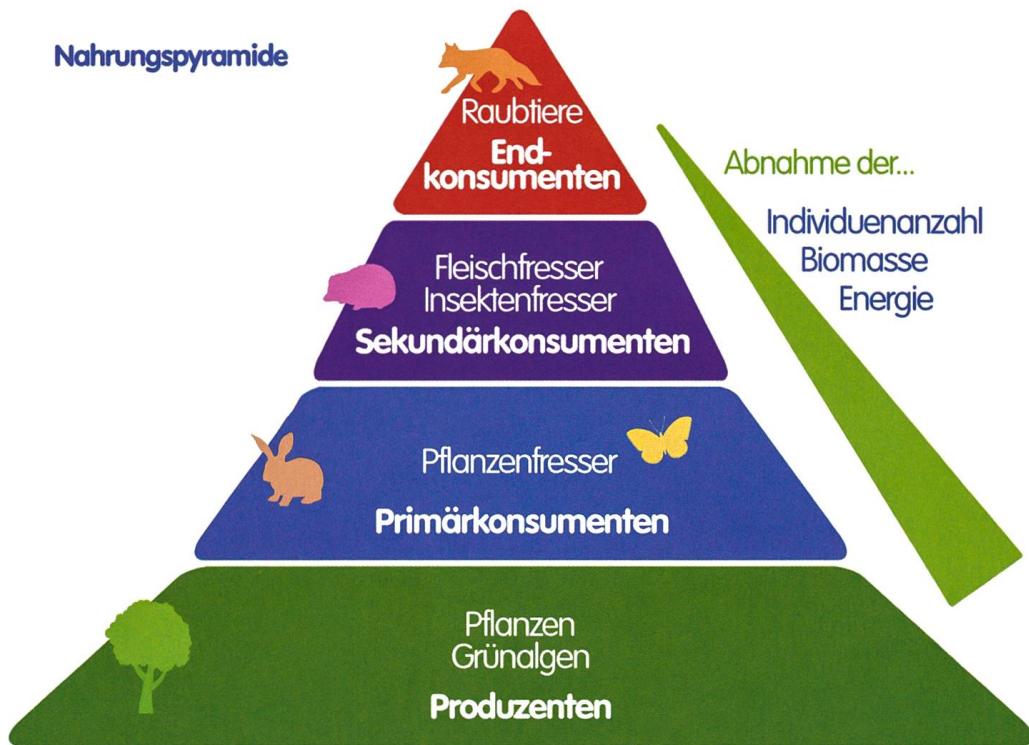


Abb. 1: Nahrungspyramide (Quelle: <https://eqiooki.de/ecology/ecosystem.php>)

Im Ökosystem werden von Ernährungsstufe zu Ernährungsstufe im Nahrungsnetz nicht nur Stoffe (Stoffkreislauf), sondern auch die in diesen Stoffen enthaltene Energie weitergegeben.

Die Energie durchfliesst die Nahrungsketten nur in einer Richtung. Es erfolgt von Ernährungsstufe zu Ernährungsstufe eine Energieabnahme um jeweils 90% (Faustregel). Der nächsten Ernährungsstufe steht also nur ein Zehntel der Energie zur Verfügung, über die die vorangegangene Ernährungsstufe verfügen konnte. Schliesslich ist die Energie «aufgebraucht».

Die auf die Erde treffende Sonneneinstrahlung ist annähernd konstant. Es gibt auch keine Hinweise auf deutliche Schwankungen in historischer Zeit. Die durchschnittliche Intensität der Sonneneinstrahlung beträgt an der Grenze der Erdatmosphäre etwa 1367 Watt pro Quadratmeter (W/m^2). Dieser Wert wird auch als Solarkonstante bezeichnet. Ein Teil der eingestrahlten Energie wird in der Atmosphäre von festen (z. B. Eiskristallen, Staub) oder flüssigen Schwebeteilchen (Aerosolen) sowie von den gasförmigen Bestandteilen gestreut und reflektiert. Ein weiterer Teil wird von der Atmosphäre absorbiert und bereits dort in Wärme umgewandelt. Der Rest geht durch die Atmosphäre hindurch und erreicht die Erdoberfläche. Dort wird er wiederum

zum Teil reflektiert und zum Teil absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die prozentuale Verteilung der Einstrahlung auf Reflexion, Absorption und Transmission hängt vom jeweiligen Zustand der Atmosphäre ab. Dabei spielen die Luftfeuchtigkeit, die Bewölkung und die Länge des Weges, den die Strahlen durch die Atmosphäre zurücklegen (abhängig von der geographischen Breite, der Jahreszeit und der Höhenlage), eine Rolle. Bei wolkenlosem Himmel kann die Intensität der Strahlung eine Leistung von etwa 1000 W/m^2 erreichen. An einem trüben Tag im Winter kann sie jedoch bis auf 50 W/m^2 oder weniger absinken. Diese Strahlungsleistung kann in der Schweiz je nach Standort und atmosphärischen Bedingungen eine Energiemenge von 900 bis 1300 Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr ($\text{kWh/m}^2 \text{ a}$) betragen. Anders sieht es zum Beispiel in der Sahara aus, wo die Einstrahlung rund $2200 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ erreichen kann. Die gesamte auf die Erdoberfläche auftreffende Energiemenge ist mehr als fünftausend Mal grösser als der Energiebedarf der Menschheit. Ein Teil der Sonnenenergie wird direkt in Form von reflektiertem Licht und Wärmestrahlung wieder an den Weltraum abgegeben. Ökologisch bedeutsam ist jedoch der Energieanteil, der eingefangen wird und das Leben auf der Erde aufrecht erhält. Dieser Anteil wird nach kürzerer (Verrotten von Falllaub) oder längerer Zeit (fossile Energieträger wie Erdgas, Kohle, Erdöl) ebenfalls an den Weltraum zurückgegeben.

Pflanzen nehmen einen Teil der Sonneneinstrahlung auf, und auch die Photovoltaik wandelt Licht in Strom um. Wie viel Energie speichern Pflanzen? Zwar speichern Pflanzen nur etwa 1% der einfallenden Sonnenenergie, aber dafür können sie dies ganz ohne menschliches Zutun. Pflanzen sind daher schon seit langem der wichtigste Energiespeicher der Menschen. Unsere heutige Wirtschaft baut auf fossilen Energieträgern auf – nichts anderes als vor langer Zeit von Pflanzen und Tieren gespeicherte und im Erdinneren komprimierte Sonnenenergie.

Folgendes Beispiel für den Energiefluss in Ökosystemen: Falls die Produzenten 1% von 1000 kWh speichern, so ergibt dies eine Energiespeicherung von 10 kWh. Davon benötigen sie für ihre eigenen Lebensprozesse 90%, also 9 kWh, und nur 1 kWh Energie steht den Primärkonsumenten als pflanzliche Nahrung zur Verfügung. Diese wiederum benötigen für die eigenen Lebensprozesse 90% der zur Verfügung gestellten Energie, also 0,9 kWh, und können lediglich 0,1 kWh den Sekundärkonsumenten als fleischliche Nahrung zur Verfügung stellen. Auch diese benötigen rund 90 % für die eigenen Lebensprozesse, also 0,09 kWh, während sich der Endkonsument in dieser Nahrungskette noch mit 0,01 kWh der ursprünglich von den Pflanzen ge-

speicherten 10 kWh begnügen muss. Diese Energieabnahme von Ernährungsstufe zu Ernährungsstufe ist letztlich dafür verantwortlich, dass die Individuenzahl von den Produzenten zu den Endkonsumenten abnimmt. Oder anders ausgedrückt: Je weniger Fleisch und je mehr Pflanzen der Mensch konsumiert, desto weniger Produktionsfläche wird benötigt.

Noch folgender Vergleich: Eine neue hochwertige Photovoltaik-Anlage wandelt bis 25% des einfallenden Lichts direkt in Strom um (Abbildung 2). Die Stromproduktion in Photovoltaikzellen ist deshalb deutlich energieeffizienter als die chemische Energiespeicherung in Pflanzen (ca. 1%). Werden nun Holzpflanzen in einem Festbettvergaser (eine spezielle Form der Biomassevergasung, wo die Ausgangsstoffe im Feuerofen auf einem Gitterrost liegen) und einem Verbrennungsmotor zur Stromgewinnung eingesetzt, ermöglicht dies im Leistungsbereich von kleinen und mittleren Anlagen (bis 5 Megawatt elektrisch, MWel) elektrische Wirkungsgrade gegen 30% der im Holz gespeicherten Energie. Das heisst, weniger als 0,3% der eingestrahlten Sonnenenergie kann bei Einsatz von Holz in Strom umgewandelt werden, während es bei



Abb. 2: Die in den LIPO-Park Schaffhausen integrierte 1,4 MWp starke Photovoltaikanlage des Elektrizitätswerks des Kantons Schaffhausen (EKS) ist die grösste stadionintegrierte Anlage der Schweiz und europaweit die grösste PlusEnergieBau-Anlage eines Fussballstadions (Stand Januar 2018). Sie erzeugt jährlich 1 290 000 kWh Strom und deckt damit 150% des Gesamtenergiebedarfs des Stadions inklusive der Mantelnutzung mit Einkaufs-, Dienstleistungs- und Gewerbezentrum. Die Fussballarena LIPO-Park wurde bereits mehrfach ausgezeichnet - namentlich mit dem Europäischen Solarpreis, dem Schweizer Solarpreis sowie dem Norman Foster Solar Award-Diplom für eine ästhetisch vorbildliche PEB-Solararchitektur.

Photovoltaikzellen bis 25% sind. Aus diesem Vergleich wird deutlich, dass der energetische «Umweg» über Pflanzen (z. B. Holz) zur Stromproduktion höchstens für die Winterhalbjahre sinnvoll sein könnte, wo auch die Abwärme zu Heizzwecken nutzbar ist. Besser ist es, das Holz zuerst als Bau- und Möbelholz oder als Lignin- und Zelluloselieferant für Ersatzkunststoffe und Verpackungsmaterial zu verwenden und die darin enthaltene Energie erst am Ende des Verwendungszyklus' zu nutzen. Der Vorteil der Pflanzen liegt jedoch in einem andern Bereich: Im Gegensatz zur Photovoltaikzelle setzen Pflanzen während des Wachstums Sauerstoff frei, fördern die Kühlung der Atmosphäre, wirken als Partikel-Filter und sind als Produzenten unerlässlich für die Nahrungsketten in den Ökosystemen.

Einschub: Der Modulwirkungsgrad von Solarzellen gibt an, wie viel Prozent der Sonneneinstrahlung die Solarmodule in Strom umwandeln können. Der Modulwirkungsgrad ist abhängig vom Wirkungsgrad der im Modul verwendeten Solarzellen, aber nicht mit ihm gleichzusetzen. Denn neben dem Material der Solarzelle beeinflusst auch die Grösse des Moduls den Modulwirkungsgrad.

Monokristalline Module erreichen einen Modulwirkungsgrad von 18–25%, polykristalline Module Wirkungsgrade von etwa 15–20%. Die Wirkungsgrade werden unter Standardbedingungen gemessen (Leistungsmessung bei 1000 W Einstrahlung, 25 °C Zelltemperatur und einer Air Mass von 1,5). Die so ermittelten elektrischen Höchstleistungen werden als Kilowatt-Peak (kWp) oder Megawatt-Peak (MWp) angegeben.

Das Air Mass ist ein relatives Mass für die Länge des Weges, den das Sonnenlicht durch die Erdatmosphäre bis zur Erdoberfläche zurücklegt. Dabei wird die effektive Weglänge zur minimalen Länge bei senkrechtem Lichteinfall in Relation gesetzt.

Die Stadt als Lebensraum enthält vor allem Konsumenten, aber kaum Produzenten im ökologischen Sinn. Eine Stadt ist daher immer auf einen Nettoimport von Stoffen und Nahrungsenergie angewiesen. Die Ernährungspyramide einer Stadt steht daher sprichwörtlich auf dem Kopf (Abbildung 3).

Städtische Ökosysteme haben einen extrem hohen Energiebedarf. Ein Mensch mit all seinen von ihm verursachten Tätigkeiten (Haushalt, Industrie, Landwirtschaft) benötigt rund 45 kWh pro Tag und somit mehr als das 20fache eines Tieres mit gleicher Grösse. Da diese Energiemengen nicht mehr

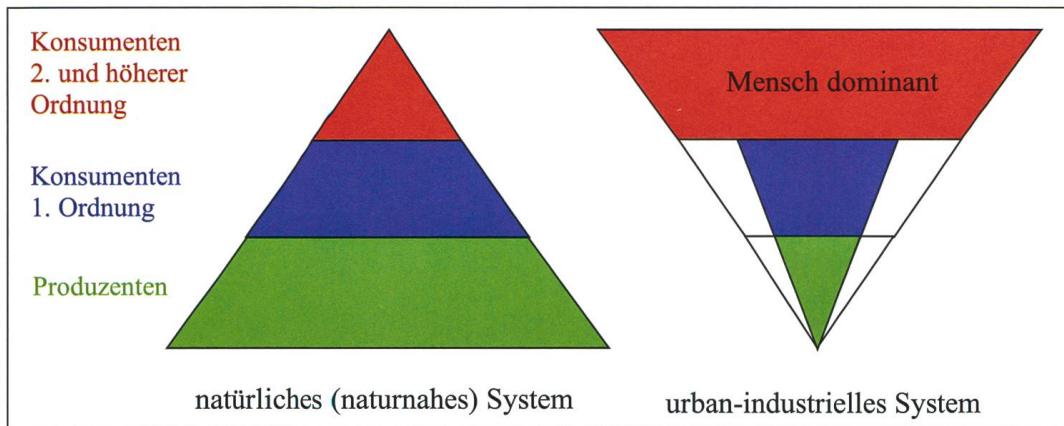


Abb. 3: Die Nahrungspyramide im urban-industriellen Ökosystem steht im Vergleich zu einem natürlichen Ökosystem buchstäblich Kopf
 (Quelle: <https://quizlet.com/412106634/stadtbiotope-flash-cards/>)

im Ökosystem Stadt gedeckt werden können, muss der Verbrauch zurzeit hauptsächlich in Form von fossilen Energieträgern wie Erdöl oder Erdgas zugeführt werden. Die darin enthaltene «wertvolle» Energie wird allerdings in den meisten Fällen nur zur Wärmegewinnung verwendet und dadurch den folgenden Stufen des Ökosystems entzogen: Die Energiekaskade wird frühzeitig unterbrochen. In dicht bevölkerten Regionen der Erde kann der Energieverbrauch um ein Vielfaches höher liegen als die solare Nettoeinstrahlung und die Photosynthese in einem naturnahen System. Allerdings könnte eine Stadt zur Aufrechterhaltung des wirtschaftlichen und sozialen Lebens ihre Energieautarkie deutlich verbessern, wenn sie die Sonnenenergie konsequent nutzte und ihre Energieeffizienz verbesserte.

3. Die Verstädterung

Menschliche Eingriffe in die städtischen Ökosysteme lassen sich eindrücklich bei einem Vergleich mit einem ländlichen Ökosystem darstellen. Nachstehende Tabelle enthält Durchschnittsangaben und Tendenzen, denn konkrete Vergleiche müssten weitere Parameter wie das lokale Klima, die topographische Lage, die Qualität der Bausubstanz, die Gebäudestruktur, die Industriestruktur und -dichte, das Einkommen, die Energieversorgungsstruktur, das Verkehrsaufkommen sowie die Grösse der Stadt berücksichtigen (Klaus Adam, 1988).