

500 (9)

Brunner, P.H.; Kral, U. (2013) "Urban Mining und 'Letzte Senken': Schlüsselemente einer Smart", In: „Smart City: Wiener Know-how aus Wissenschaft und Forschung“, Schmid Verlag, Wien, p. 248-255.  
ISBN 978-3-900607-50-0

---



# „Urban Mining“ und „Letzte Senken“: Schlüsselemente einer Smart City

PAUL H. BRUNNER, ULRICH KRAL

Der Stoffwechsel moderner Städte ist unvorstellbar groß. In Wien beispielsweise werden jährlich pro Einwohner rund 200 Tonnen an Materialien umgesetzt. Für die Stadt als Ganzes beträgt der Jahresumsatz rund 340 Millionen Tonnen. Dieser „urbane Metabolismus“ stellt nicht nur hohe Anforderungen an die Versorgung, auch die Entsorgung von Abluft, Abwasser und Abfällen ist eine beträchtliche Herausforderung.

## Die Stadt als Durchflussreaktor

Auf der Inputseite ist es die Ressourcenverfügbarkeit, die gewährleistet sein muss, auf der Outputseite müssen Wasser, Boden und Luft geschützt werden, um die wesentlichen Dienstleistungsfunktionen der Umwelt aufrechtzuerhalten (Primärproduktion, Mineralisierung, Stoffkreisläufe, Artenvielfalt).

Der massenmäßig wichtigste Güterumsatz besteht aus rund 150 t/E.a (Trink-)Wasser, gefolgt von 36 t/E.a Luft. Die restlichen Güter

wie Baumaterialien (Kies, Sand, Steine) für Netzwerke (Verkehr, Wasser/Abwasser, Energie, Information), Metalle, Energieträger, Fahrzeuge, Lebensmittel und weitere Produkte machen weitere 20 t/E.a aus. Der größte Anteil dieser Güter wird importiert, Wien ist damit sehr stark von einem regionalen (Wasser, Baumaterial) bis globalen (Luft, fossile Brennstoffe, Metalle) Hinterland abhängig. Von den insgesamt rund 200 Tonnen pro Einwohner werden mehr als 95 % wieder exportiert, meist als Abwasser und Abluft. Feste Abfälle betragen etwa drei Tonnen pro Einwohner und Jahr, der größte Anteil besteht aus Baurestmassen. Der Prozentsatz an insgesamt in anthropogenen Kreisläufen recyculierten Gütern ist gering, d. h. der Stofffluss Wiens ist – insbesondere wegen des großen Anteils an Wasser und Luft – vorwiegend ein linearer. Bemerkenswert ist die Verwertung der Abfälle: Rund 50 % der festen Abfälle werden bereits heute stofflich verwertet, und der Rest wird einer thermischen Verwertung zugeführt.

Die in Städten verwendeten Güter bestehen aus sehr vielen verschiedenen Stoffen (chemische Elemente und Verbindungen). Rund 30.000 chemische Verbindungen werden täglich in hohen (Tonnen-)Mengen verwendet. Die gesamte Anzahl an bekannten Stoffen beträgt mehrere Millionen, jährlich kommt eine weitere Million hinzu. Diese Stoffe, die manchmal nur in geringen Mengen Anwendung finden, sind für die Eigenschaften und Funktionen moderner Güter wichtig: Sie ermöglichen neue Anwendungen in der Informations- und Energietechnik, sie erhöhen die Lebensdauer, indem sie gegen Licht, UV oder Mikroorganismen schützen, sie verhindern Gefahren, indem sie beispielsweise die Feuerfestigkeit erhöhen oder sie verbessern die Produkteigenschaften, indem sie Zähigkeit und Schlagfestigkeit erhöhen sowie Korrosion verhindern. Einige der eingesetzten chemischen Verbindungen können jedoch die Gesundheit gefährden: Sie sind toxisch, kanzerogen, erbgutschädigend oder hormonell wirksam. Andere sind von ökotoxikologischer Bedeutung und beeinflussen die Bodenfruchtbarkeit oder die Artenvielfalt negativ.

## Der Stoffwechsel von modernen Metropolen ist unvorstellbar groß.

Es ist deshalb notwendig, den urbanen Metabolismus daraufhin zu prüfen, wohin problematische Stoffflüsse gelenkt werden, ob Wasser, Boden oder Luft mit Schadstoffen an-

gereichert werden. Jedenfalls braucht es Filtersysteme zwischen der Stadt und der Umwelt, die in der Lage sind, Schadstoffe, die den „Durchflussreaktor Stadt“ verlassen, zuverlässig entweder in harmlose Stoffe umzuwandeln, oder sie in sicheren sogenannten „Letzten Senken“ abzulagern. Solche Filtersysteme stellen Müllverbrennungsanlagen und Abwasserreinigungsanlagen dar. Beide sind in der Lage, Schadstoffe ab- und umzubauen. Insbesondere thermische Anlagen, die bei hohen Temperaturen organische Schadstoffe zerstören und mineralisieren, d. h. in CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und weitere einfache Moleküle zerlegen können, sind ein unverzichtbarer Bestandteil einer Smart City. Aufgrund des bereits bestehenden großen Bestands an in der Vergangenheit eingesetzten, langlebigen organischen Schadstoffen bleiben sie – auch im Fall einer aktiven Vermeidungsstrategie – unersetzlich.

## Die Stadt als Rohstofflager

Pro Einwohner und Jahr werden etwa vier bis zehn Tonnen importierter Materialien in den Bestand der Stadt Wien eingebaut. Bereits heute besitzt jeder Wiener und jede Wienerin im Durchschnitt ein Stofflager von rund 350 Tonnen. Dieses Stofflager besteht vor allem aus langlebiger Infrastruktur (Bauwerke wie Wohn-, Dienstleistungs- und Industriegebäude, Straßen und weitere Netzwerke) und Gebrauchsgütern (Fahrzeuge, Einrichtungsgegenstände usw.). Es wächst mit durchschnittlich sieben Tonnen und wird – gleiches Wachstum vorausgesetzt – in rund 50 Jahren doppelt so groß sein wie heute. Die Bedeutung dieses Lagers kann nicht unterschätzt werden: Einerseits wird die Menge an Abfällen in Zukunft – am Ende der Lebensdauer der Produkte im

Bestand – zunehmen. Diese Abfälle stellen eine wertvolle stoffliche Ressource für morgen dar (Stichwort Urban Mining, siehe z. B. [www.urbanmining.at](http://www.urbanmining.at)). Die großen Mengen an Baumaterialien, die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in der urbanen Infrastruktur eingesetzt wurden, gelangen erst jetzt, und – infolge des Wachstums – vermehrt noch in Zukunft in die Abfallwirtschaft. Sie stellen ein großes, zukünftig zu nutzendes Potenzial an Sekundärressourcen dar.

## Die anthropogenen Lager sind voll und stehen schon bald als Sekundärressourcen zur Verfügung.

Andererseits stellt dieses Stofflager auch eine Hypothek dar: Die Art und Weise, wie es zusammengesetzt ist, ist relevant für den Energiebedarf und den Umweltschutz der nächsten Jahre. Beispielweise sind immense Anstrengungen notwendig, um das „Bauwerk Stadt“ so zu adaptieren (Wärmedämmung, passiver Sonnenschutz etc.), dass der aus der Raumheizung/Klimatisierung resultierende CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf ein umweltverträgliches Ausmaß reduziert werden kann. Auch das Materiallager in den Verkehrssystemen entspricht nicht einer Energie- und CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaftsweise und wird in den nächsten Jahrzehnten auf die Problematik des Klimawandels ausgerichtet werden müssen.

Wie bereits geschildert, enthält dieses Lager auch ein erhebliches Schadstoffpotenzial. Viele Stoffe befinden sich darin, die heute als Schadstoffe bekannt sind, in der Vergangenheit in großen Mengen eingesetzt wurden, heute aber nicht mehr zugelassen sind. Dazu gehören beispielsweise polychlorierte Biphenyle (PCB) in elektrischen Geräten und Fugenmassen, halogenierte Kohlenwasserstoffe (FCKW) in Baumaterialien, Cadmium in langlebigem Polyvinylchlorid (PVC) oder bromierte Flammschutzmittel in Kunststoffen. Nicht nur müssen diese Schadstoffe umweltgerecht entsorgt werden. Es muss auch gewährleistet sein, dass sie nicht in Kreisläufe geraten. Insbesondere für langlebige, hochstabilisierte Kunststoffe, aber auch für Metallschrotte oder Althölzer stellt das Etablieren sauberer Kreisläufe eine große Herausforderung dar. Diese Problematik wird in Zukunft noch zunehmen, da die Zusammensetzung der Gebrauchs- und Verbrauchsgüter in den letzten Jahrzehnten immer vielfältiger und unübersichtlicher geworden ist. Es gibt keine Anzeichen dafür, dass sich dieser Trend in Zukunft umkehren würde.

### „Urban Mining“ als langfristige Rohstoffquelle

Die Wiedergewinnung von Metallen, Baurestmassen, Kunststoffen und weiteren Materialien aus anthropogenen Materialbeständen wird manchmal mit dem Begriff „Urban Mining“ bezeichnet. In jüngster Zeit werden auch die Deponien in die Überlegungen zur Rückgewinnung von Rohstoffen einbezogen. Was versteht man unter „Urban Mining“? „Urban Mining“ umfasst wesentlich mehr als bloßes Recycling. Das Ziel sind nachhaltige und saubere Kreisläufe, d. h. das langfristige, multiple

und schadstofffreie Recycling von Materialien nach Ablauf der wirtschaftlich-technischen Lebensdauer. Um dieses Ziel zu erreichen, muss „Urban Mining“ wie folgt definiert werden: Es ist eine systematische, zielorientierte Planung, Gestaltung und Mehrfachnutzung von anthropogenen Materialbeständen zum Zweck der optimalen Ressourcenschonung und des langfristigen Umweltschutzes. Als anthropogene Materialbestände stehen Stofflager in Bauwerken, Infrastruktur und Gebrauchsgütern im Vordergrund, aber auch Deponien und Abraumhalden des Bergbaus können durch „Urban Mining“ ausgebeutet werden. Allerdings zeigen grobe Abschätzungen, dass der Materialbestand in Letzteren weniger groß ist als in Ersteren. „Urban Mining“ ist eine notwendige Strategie für eine Smart City und besteht aus folgenden vier Eckpfeilern:

#### Design for Urban Mining

Gestaltung von Produkten, Verfahren und Systemen nach den Gesichtspunkten einer langfristigen Mehrfachnutzung: Heutige Güter sind komplexe Stoffgemische. Sie können oft nur schwer in einzelne Stoffe zerlegt und damit effizient rezirkuliert werden. Zukünftig sollen die Aspekte eines zweiten und mehrfachen Stoffkreislaufes bereits beim Design berücksichtigt und ins Produkt eingebaut werden. Gesucht sind Güter, die sich einfach, d.h. mit geringem Aufwand an Energie und materiellen Ressourcen in stofflich einheitliche, wiederverwertbare Sekundärrohstoffe umwandeln lassen.

#### Urbane Prospektion

Analog zum Bergbau braucht es auch für ein „Urban Mining“ Methoden, um die Lage und die Abbauwürdigkeit von Ressourcen zu be-

stimmen. Im Bergbau werden geologische, geophysikalische und geochemische Methoden der Prospektion zur Suche und Erkundung von neuen Lagerstätten angewandt. Auch für „Urban Mining“ benötigt man entsprechende Methoden zum Finden und zur Bewertung von urbanen Lagerstätten. Derzeit steckt die Prospektion von urbanen Ressourcen noch in den Kinderschuhen. Um ein „Urban Mining“ wirtschaftlich konkurrenzfähig zum primären Bergbau zu gestalten, ist es notwendig, entsprechende Methoden zur Prospektion urbaner Rohstoffe zu erforschen und anzuwenden. Die Resultate solcher Methoden sind Informationen über Menge, Spezifizierung, Vergesellschaftung und Verortung von sekundären Ressourcen, alles Vorbedingungen für erfolgreiches „Urban Mining“.

#### Ressourcenkataster

Derzeit ist der Aufenthaltsort von Stoffen in einer Stadt meist nicht bekannt, er kann nur grob abgeschätzt werden. Vor allem bei Gütern mit langer Lebensdauer fehlen am Ende der Lebensdauer Informationen über Art, Menge und Zusammensetzung der Güter. Deshalb kann auch nicht vorausgesagt werden, wann, wo und in welchen Mengen Stoffe in einer Stadt für ein „Urban Mining“ zur Verfügung stehen werden. Die Information über Stoffe war jedoch bei der Errichtung aller Bauwerke, beispielsweise als Leistungsverzeichnis, vorhanden, sie wurde nur nicht aufbewahrt. In Zukunft gilt es, die stofflichen Informationen systematisch zu bewahren oder – falls fehlend – zu erheben, zu verwalten und den entsprechenden Nutzern am Ende der Lebensdauer für ein Recycling zur Verfügung zu stellen. Denkbar sind ein Produktpass für einzelne

Objekte („Gebäudepass“) sowie ein Ressourcenkataster auf lokaler und regionaler Ebene. Sie geben einer Smart City Auskunft darüber, wo welche Stoffe in welchen Massen, Konzentrationen und Vergesellschaftungen vorhanden sind und wann diese ihr wirtschaftliches Lebensende erreichen werden.

**Hightech für Trennung und Rückgewinnung**  
Weitere Vorbedingungen sind Technologien, um aus den vorhandenen Sekundärressourcen die wertvollen Stoffe einerseits und die wertlosen und Schadstoffe andererseits auf wirtschaftliche Art und Weise abzutrennen. Hier besteht eine große Lücke. Es gilt, neue Hightechprozesse zu entwickeln, die die komplexen Gemische auftrennen und für die Sekundärstoffwirtschaft verfügbar machen können. Dazu sind physikalische, physikalisch-chemische wie auch chemische Prozesse zu entwickeln, die mit wenig stofflichem und energetischem Aufwand die Gewinnung von wertvollen, sauberen Produkten erlauben. Für die langfristig umweltverträgliche Entsorgung der Rückstände müssen sichere letzte Senken (beispielsweise Untertagedeponien) zur Verfügung gestellt werden.

Eine auf diesen vier Eckpfeilern aufgebaute Bewirtschaftung von sekundären Rohstoffen des anthropogenen Lagers geht weit über ein bloßes Recycling hinaus und wird zu Recht mit dem neuen Begriff „Urban Mining“ bezeichnet. Wie beim traditionellen Bergbau wird es auch beim neuen „Stadtbau“ eine Weile dauern, bis die neuen Ansätze und Technologien entwickelt und umgesetzt werden. Die Zeit ist reif, die anthropogenen Lager sind voll und stehen schon bald als Sekundärressourcen zur Verfü-

gung. Für Smart Cities gilt es, diese neuen Chancen beim Schöpf zu packen.

### Ohne „Letzte Senken“ können Smart Cities nicht überleben

Mithilfe von „Urban Mining“ werden wertvolle Materialien einer erneuten Nutzung zugeführt. Gleichzeitig drängt sich die Frage auf, was mit jenen Materialien passiert, die nicht rückgeführt werden können oder sollen. Sei es, weil sie in zu geringer Menge und Konzentration anfallen, weil sie mit anderen Materialien vermischt sind und sich somit einer Rückgewinnung unter ökonomischen/ökologischen Randbedingungen entziehen oder, weil sie aus gesundheitlichen oder ökologischen Gründen dem Kreislauf entzogen werden müssen. Was soll also beispielsweise passieren mit den: (1) Schwermetallen in Konsumgütern, Bremsabrieben, Dachbeschichtungen, (2) organischen Verbindungen in Flammschutzmitteln, Weichmachern, Schaumstoffen und (3) Nährstoffen in verbrauchter respektive umgesetzter Biomasse? All diese Materialflüsse werden in Städten freigesetzt und stellen Bürger und Stadtverwaltungen vor logistische und technische Herausforderungen.

## „Senken“ sind in ihrer Aufnahmekapazität beschränkt.

Zukunftsweisende Entsorgungskonzepte in Smart Cities sehen – neben der Kreislaufführung – die kontrollierte Verbringung in sogenannten „Senken“ und „Letzten Senken“ vor. Allerdings sind „Senken“ und „Letzte Senken“

in ihrer Aufnahmekapazität beschränkt und müssen deshalb sachgemäß und vorausschauend bewirtschaftet werden. Was sind nun „Senken“ bzw. „Letzte Senken“ am hinteren Ende des städtischen Stoffwechsels?

Im Allgemeinen ist eine „Senke“ das Gegenteil einer Quelle. In einer „Senke“ werden Stoffe gelagert oder sie verschwinden dort (Umwandlung in andere Stoffe z. B. Verbrennung zu Kohlendioxid und Wasser). Beispielsweise dient der Boden einer Stadt als Senke für staubförmige Emissionen aus dem Kfz-Verkehr. Eine Kläranlage dient als Senke für städtisches Abwasser, eine Kompostieranlage als Senke für Grünschnitt und eine Deponie als Senke für Reststoffe.

Oft verbleiben Stoffe nur für kurze bis mittlere Zeiträume in „Senken“ und werden durch natürliche oder anthropogene Prozesse weitertransportiert. Beispielsweise wird ein erheblicher Anteil an Kohlenstoff, Stickstoff und Salzen aus der Senke „Hausmülldeponie“ mobilisiert und via Sickerwässer je nach Behandlung in eine Abwasserreinigungsanlage oder in die Gewässer eingeleitet.

Ein Spezialfall ist die sogenannte „Letzte Senke“. In ihr sind die Aufenthaltszeiten je nach Stoff sehr groß und jedenfalls über 10.000 Jahre. Falls ein Stoff eine derart lange Aufenthaltszeit in einer Senke besitzt, wird er nur äußerst langsam aus dieser Senke heraustransportiert, d. h. er ist in hohem Maße immobil und wird mit hoher Wahrscheinlichkeit außerhalb der „Letzten Senke“ keinen Schaden anrichten. Wird ein Stoff durch einen Prozess zerstört (z. B. Verbrennung von Phenol zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O), so stellt dieser Prozess ebenfalls eine „Letzte Senke“ für den Stoff dar. Die Müllverbrennung ist deshalb für viele organische

Schadstoffe (aber auch für gesundheitsgefährdende Mikroorganismen) die „Letzte Senke“.

## Die Müllverbrennung ist für organische Schadstoffe die notwendige „Letzte Senke“.

Beide Typen „Letzte Senken“ sind notwendig, um Schadstoffe umweltverträglich unterzubringen. Für anorganische Stoffe, die nicht zerstört, sondern nur umgewandelt werden können, braucht es diese langfristigen, „definitiven“ Lager, in denen Stoffe sicher und für geologische Zeiträume von der Umwelt abgeschlossen werden können. Derzeit werden insbesondere Salzbergwerke und andere geologische Formationen, die über Jahrtausende vom Wasserhaushalt abgeschlossen waren, als sichere „Letzte Senken“ betrachtet.

Eine „Letzte Senke“ kann somit als das hintere, letzte Ende eines spezifischen Stoffflusses bezeichnet werden. Die Unterscheidung zwischen „Senke“, in der Stoffe nur eine beschränkte Aufenthaltszeit haben und „Letzter Senke“, in der sie beinahe unendlich lange verweilen, bedarf besonderer Aufmerksamkeit: Die Müllverbrennungsanlage ist zwar eine letzte Senke für organische Verbindungen; für Metalle kann sie jedoch lediglich als „Senke“ bezeichnet werden. Diese werden aufgrund ihrer Stoffeigenschaften nicht zerstört, sondern gelangen in die Verbrennungsprodukte, die – falls sie stark mit Schwermetallen angereichert sind wie die Rauchgasreinigungsprodukte –

vorzugsweise in der „Letzten Senke“ Untertagedeponien entsorgt werden müssen. Die thermische Behandlung stellt mit anderen Worten für Metalle nur eine „Senke“ auf dem Weg zur unverzichtbaren „Letzten Senke“ dar.

Zweck eines jeden städtischen Entsorgungskonzeptes ist es, alle nicht verwertbaren Abfallströme (Emissionen, flüssige und feste Abfälle) letztendlich vollständig, d. h. ohne Bypässe, in eine „Letzte Senke“ überzuführen. Damit wird sichergestellt, dass Schadstoffe umweltverträglich bewirtschaftet werden.

## Die Aufgabe der Zukunft lautet „saubere Kreisläufe“ und „umweltverträgliche „Letzte Senken“.

Die Geschichte zeigt, dass der Mensch einerseits „Letzte Senken“ künstlich schafft sobald natürliche letzte Senken überlastet sind und negative Effekte sichtbar werden (z. B. Katalysator für Pkw als „Letzte Senke“ von NO<sub>x</sub> aus Autoabgasen, biologische Abwasserreinigung als „Letzte Senke“ zur Entfernung abbaubarer organischer Verbindungen). Damit wird die Senkenkapazität erhöht, um Umweltqualitätsstandards erfüllen zu können. Andererseits zeigt sich auch, dass „Letzte Senken“ nicht für jeden Abfallstrom gefunden, ohne Bypass angesteuert oder rechtzeitig geschaffen werden können (Treibhausgase, FCKW, DDT, Schwermetalle im Kfz-Bremsabrieb etc.). In jedem

Fall müssen Smart Cities die Nutzung der stofflichen Ressourcen im Hinblick auf die Kapazität der „Senken“ und „Letzten Senken“ abstimmen. In serviceorientierten Städten wie Wien gilt es beispielweise, den fossilen Kohlenstoffausstoß mit effektiven Maßnahmen zu reduzieren, sodass die „Senke“ Atmosphäre nicht überlastet wird. Oder es gilt, die Schwermetalleinträge in der Senke „Stadtboden“ zu beleuchten und im Falle einer Überbeanspruchung quellenorientierte Maßnahmen zu ergreifen.

Für eine Stadt sind die Perspektiven „Saubere Kreisläufe“ und umweltverträgliche „Letzte Senken“ entscheidend und unabdingbar, um die umweltverträgliche Ressourcennutzung in Abstimmung mit den vorhandenen Senkenkapazitäten langfristig sicherstellen zu können. Um das Smart-City-Konzept auf eine tragfähige, breite Basis zu stellen, bedarf es nicht nur der „Letzten Senken“ für CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> aus fossilem Kohlenstoff (Energieversorgung, Verkehr u. a.), sondern auch solcher für weitere essenzielle Stoffe, wie Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor), Schwermetalle und organische Verbindungen. Bisher wurde die Frage nach der „Letzten Senke“ in diesem umfassenden Sinne weder gestellt noch beantwortet. „Letzte Senken“ sind ein notwendiger Bestandteil von Smart Cities, ohne die ihr Überleben langfristig nicht gesichert ist.

### Conclusio

Der Massenerhaltungssatz gilt auch für Städte: Was in Städte importiert wird, kann entweder in der Stadt akkumuliert werden oder muss über kurz oder lang aus der Stadt exportiert werden. Die Zukunftsaufgabe für Smart Cities besteht darin, einerseits die sehr großen Mate-

rialmengen einer Stadt nach deren Lebensdauer über saubere Kreisläufe einer wirtschaftlichen Mehrfachnutzung zuzuführen und andererseits die auszuschleusenden Schadstoffe in sicheren „Letzten Senken“ umweltverträglich zu entsorgen. Städte, die diese Aufgabe nicht nur als reine Recycling- und Entsorgungsaufgabe erkennen, sondern als gestalterischen und planerischen Prozess, werden als

eigentliche Smart Cities langfristig einen erheblichen wirtschaftlichen und ökologischen Vorteil erzielen.

### Quelle

- Baccini, P. und Brunner, P. H. (2012): Metabolism of the Anthroposphere: Analysis, Evaluation, Design. MIT Press, ISBN 978-0-262-01665-0, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge

### AUTOREN

**Prof. Dr. DI Paul H. Brunner** Vorstand Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft TU Wien; Professor für Abfallwirtschaft, mit Forschungsschwerpunkt Analyse, Bewertung und Gestaltung des ressourcenschonenden und umweltverträglichen urbanen Stoffhaushalt.

**DI Ulrich Kral** Universitätsassistent am Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft TU Wien, Stoffflussanalysen von anthropogenen Systemen mit Fokus auf dissipativen Stoffverlusten und „Letzte Senken“, insbesondere von Infrastrukturanlagen.