

Wärmeinseln im Treibhaus

Städte haben ihr eigenes Klima. So liegen die Temperaturen dort meist höher als im Umland. Deshalb lohnt es sich, die Auswirkungen der globalen Erwärmung auf unsere Metropolen gesondert zu betrachten – auch im Hinblick darauf, wie Städteplaner sich schon heute darauf vorbereiten sollten.

Von K. Heinke Schlünzen

Weltweit lebt inzwischen jeder zweite Mensch in einer Stadt; in Deutschland gilt das sogar für drei von vier Einwohnern (Zahlen der Vereinten Nationen für alle Länder unter <http://esa.un.org/unup>). Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird die Verstädterung weiter zunehmen, vor allem in den Staaten, in denen heute noch vergleichsweise viele Menschen auf dem Land leben. Um 2050 dürften zwei von drei Erdbewohnern Städter sein.

Das ist gleich in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung, wenn es um Fragen des Klimawandels geht. So tragen Städte stärker zur globalen Erwärmung bei als ländliche Regionen; denn sie benötigen wegen der hohen Bevölkerungs- und Verkehrsdichte weitaus mehr Energie und Rohstoffe pro Hektar. Deren Gewinnung, Bereitstellung und Verbrauch bringt beträchtliche Emissionen an Treibhausgasen und Schadstoffen mit sich. Diese fallen zwar nicht immer in den Städten selbst an. Dennoch ist die Luftbelastung dort höher als auf dem Land.

Städte tragen aber nicht nur überproportional zum Klimawandel bei, sondern erzeugen durch ihre von Menschen-

hand überformten Oberflächenstrukturen – Gebäude unterschiedlichster Höhe und Dichte, Industrieanlagen, Straßen, Parks, Wiesen, künstliche Gewässer – auch ein eigenes, lokales Klima, das so genannte Stadtklima. So liegen die Temperaturen abends und nachts über denen im Umland. Zwar ist es zwischen den Häuserzeilen weniger windig, doch treten dafür stärkere Böen auf, und die Schadstoffbelastung der Luft ist höher. Auch die Strahlungs- und Beleuchtungsverhältnisse unterscheiden sich von denen auf dem Land – ebenso die Niederschlagsmuster. Deshalb untersuchen Klimaforscher, wie sich die für die nächsten Jahrzehnte erwartete Erderwärmung speziell auf Städte auswirken wird. Immerhin lebt dort, wie eingangs erwähnt, schon heute die Mehrheit der Bevölkerung – mit steigender Tendenz – auf engstem Raum beieinander und ist damit direkt betroffen.

Unter Klima verstehen Meteorologen das typische Wetter. Damit sind nicht nur die Mittelwerte von Messgrößen wie Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeiten gemeint, sondern auch die Abweichungen davon, also die gesamte statistische Verteilung einzelner meteorologischer Parameter. Der Beobachtungszeitraum beträgt mindestens 30 Jahre; denn er muss groß genug sein, dass kurzzeitige zufällige Schwankungen die Verteilungsfunktionen nicht mehr wesentlich verändern. Länger andauernde Abweichungen vom typischen Wetter deuten dann auf eine Klimaänderung hin.

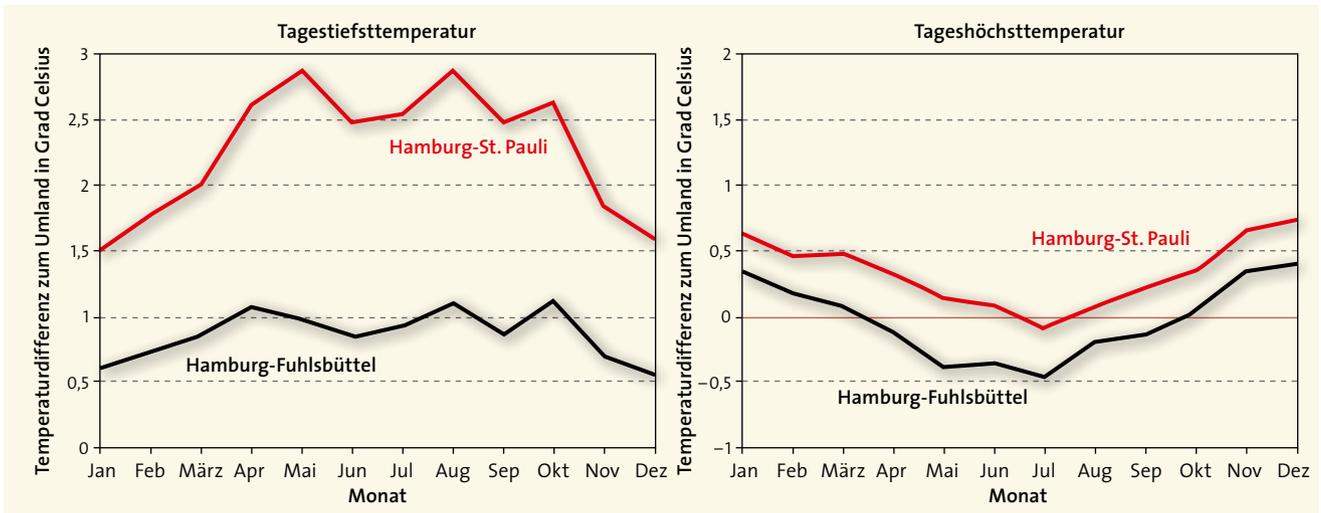
Aus meteorologischer Sicht sind vor allem direkt am Boden gemessene Daten wie Windgeschwindigkeit und -richtung, Temperatur, Niederschlagsmenge und Luftfeuchte von Interesse. Aber auch abgeleitete Größen wie die Dauer von Trockenperioden oder Kältewellen spielen eine Rolle. Bei allen Betrachtungen stehen die statistische Verteilung der Klimaparameter und deren Änderung im Vordergrund.

Wenn von der Erderwärmung die Rede ist, geht es meist um die globale Mitteltemperatur. Was die einzelnen Menschen unmittelbar betrifft, sind aber die regionalen Klimaänderungen. Diese können ganz anders – und deutlich extremer – ausfallen (siehe den Beitrag »Wie hart trifft es Deutschland?«, S. 19). Das regionale Klima für eine Stadt hängt von ihrer geografischen Lage ab und wird durch die topogra-

AUF EINEN BLICK

STADTENTWICKLUNG IN ZEITEN DES KLIMAWANDELS

- 1 Durch ihre **Oberflächenstrukturen** tragen Städte mehr zur **Erderwärmung** bei als ländliche Regionen. Hier werden auch mehr Menschen davon betroffen sein.
- 2 Schon heute sind Städte **Wärmeinseln**, deren Temperatur teils deutlich über denen des Umlands liegt. Wegen der hohen Emissionen und weil die dichte Bebauung die Durchmischung der Luftmassen erschwert, ist auch die **Schadstoffbelastung** höher.
- 3 Erste Untersuchungen und Simulationen zeigen, dass der **allgemeine Temperaturanstieg** auch die Städte voll erfassen dürfte, so dass es dort noch erheblich wärmer sein wird.
- 4 Da Gebäude im Durchschnitt erst nach etwa 50 Jahren grundlegend saniert oder abgerissen werden, sollten Städteplaner schon jetzt die künftigen Klimabedingungen berücksichtigen – etwa durch bessere **Wärmedämmung**, **Begrünung von Dächern** und das Zurückhalten von Regenwasser auf **Sickerflächen**.



K.H. SCHLÜNZEN, P. HOFFMANN, G. ROSENHAGEN UND W. RIECKE

In unseren Breiten wirken Städte als Wärmeinseln. Die Tagestiefsttemperaturen (links) liegen dort ganzjährig über denen im Umland. Bei den Höchsttemperaturen (rechts) gilt das zumindest für den Winter. Je dichter die Bebauung, desto größer ist der Temperaturunterschied zum grünen Umland. Das zeigt der Vergleich zwischen den Hamburger Stadtteilen St. Pauli und Fuhlsbüttel.

fischen Verhältnisse oder auch durch Wasserflächen beeinflusst. So strömt bei bestimmten Wetterlagen kühle Luft vom Schwarzwald durch das Höllental nach Freiburg. Ein anderes Beispiel ist der Föhn in München, ausgelöst durch Fallwinde am Nordrand der Alpen. Küstenstädte wiederum profitieren im Sommer von kalter Seeluft, die der nachmittäglichen Hitze entgegenwirkt.

Unterschiede zum Umland

Städte schaffen sich ihr Klima aber auch bis zu einem gewissen Grad selbst: Temperatur, Druck, Luftfeuchte und Windverhältnisse unterscheiden sich in ihrem Wert und ihrer Heterogenität vom Umland. All das sind nicht nur kurzzeitige Abweichungen, sondern langfristige lokale Besonderheiten, welche die Witterungsverhältnisse über weit mehr als 30 Jahre prägen. So wird im einfachsten Fall die Nordseite eines Gebäudes in unseren Breiten fast nie direkt von der Sonne beschienen, was sich etwa auf die Temperatur und Bodenfeuchtigkeit im Gebäudeschatten auswirkt.

Der Begriff Stadtklima bezieht sich in erster Linie auf Parameter, die für den Menschen von unmittelbarer Bedeutung sind. Das gilt zunächst einmal für klassische meteorologische Messgrößen. So beeinflusst die Temperatur unser Wärmeempfinden. Die Luftfeuchte bestimmt über Schwüle oder Trockenheit. Starke böige Winde können unser Wohlbefinden empfindlich stören. Und ob es regnet, bedeckt ist oder die Sonne scheint, wirkt sich merklich auf unsere Stimmung aus. Der Begriff Stadtklima umfasst aber auch weitere Parameter, welche die Gesundheit beeinträchtigen können – beispielsweise die Konzentrationen von Schadstoffen wie Stickoxiden, Ozon oder Feinstaub.

Wie Meteorologen schon seit Langem wissen, sind Städte in unseren Breiten nächtliche Wärmeinseln, deren Durch-

schnittstemperatur die im Umland übersteigt. Das liegt vor allem an ihrer künstlichen Oberflächenstruktur aus dichten Ansammlungen von Gebäuden mit geteerten Straßen dazwischen. Generell nimmt der Erdboden tagsüber, wenn die Lufttemperatur hoch ist und die Sonne ihn eventuell zusätzlich aufheizt, Wärme auf und gibt sie nachts wieder ab. Das dämpft den Tagesgang der Temperatur. In der Stadt verstärken die versiegelten und mit Beton, Stein oder anderen dichten Materialien bedeckten Oberflächen diesen Effekt; denn sie absorbieren an heißen Sommertagen viel mehr Wärme und speichern sie wirksamer als naturbelassene Böden. Dadurch wirken sie am frühen Abend und in der ersten Nachthälfte wie riesige Heizöfen, welche die Abkühlung verlangsamen.

Hinzu kommt, dass in bebauten Bereichen auch die Luftzirkulation und die langwellige Ausstrahlung behindert ist. Dadurch dauert die Überwärmung unter Umständen bis in die späten Nachtstunden an. Die Minimaltemperaturen liegen deshalb erheblich über denen im Umland (Grafik oben). Die Maximaltemperaturen können wegen der Wärmeaufnahme durch die dichte Bebauung dagegen etwas geringer sein als in der ländlichen Umgebung. Obwohl viele Städte im Hochsommer deswegen tagsüber schwache Kälteinseln sind, übertrifft ihre über 24 Stunden gemessene Durchschnittstemperatur die auf dem Land.

Im Winter, wenn die Sonne wenig Wärme spendet, sorgt ein weiterer Eingriff des Menschen in die Energiebilanz der Oberflächen dafür, dass es in der Stadt nicht nur nachts, sondern auch tagsüber wärmer ist als außerhalb: Die Energieverluste von Gebäuden, Industrieanlagen und Verkehr heizen die umgebende Luft auf. Diese Wärmeabgabe liegt nachts bei etwa 5 bis 10 Watt pro Quadratmeter und kann tagsüber 100 Watt pro Quadratmeter erreichen. Im Einzelfall sind noch weitaus höhere Werte möglich. So haben Wissenschaftler um

Toshiaki Ichinose vom japanischen Nationalinstitut für Umweltstudien in Tsukuba für die Innenstadt von Tokio Ende der 1990er Jahre eine Wärmeabgabe von 1590 Watt pro Quadratmeter ermittelt – mehr als das, was an Sonnenenergie von außen auf die Atmosphäre trifft.

Je dichter die Bebauung, desto ausgeprägter ist der Wärmeinseleffekt. Beispiel Hamburg: Hier registrieren die Messstationen in St. Pauli im Sommer sehr viel höhere Werte als im üppig begrünten Umland; im weniger dicht bebauten Stadtteil Fuhlsbüttel ist der Unterschied dagegen deutlich geringer.

Wie stark eine Stadt als Wärmeinsel wirkt, hängt annähernd logarithmisch von der Zahl der Einwohner ab (Bild unten). Allerdings spielen auch regionalklimatische Faktoren eine Rolle. Unter anderem fällt die Überwärmung umso geringer aus, je höher die Windgeschwindigkeit, der Bedeckungsgrad des Himmels und die Luftfeuchte sind. Würden sich durch den Klimawandel diese Faktoren ändern, könnte sich also selbst bei gleicher Energienutzung und Stadtstruktur der Wärmeinseleffekt verstärken oder abschwächen. Für das meistverwendete A1B-Szenario des UN-Klimarats (siehe den Beitrag auf S. 19) haben Peter Hoffmann, Oliver Krüger und ich mit einem statistischen Modell allerdings gezeigt, dass sich die Überwärmung in Städten im Mittel kaum ändern dürfte. Zu einem ähnlichen Resultat gelangten Barbara Früh, Meinolf Koßmann und Marita Roos vom Deutschen Wetterdienst für Frankfurt (Main).

Das bedeutet aber auch, dass die auf uns zukommende Erwärmung voll auf die städtischen Wärmeinseln durchschlagen wird. Gemäß dem A1B-Szenario steigt die mittlere Lufttemperatur in Deutschland bis Ende des Jahrhunderts im Winter um etwa 2,5 bis 4 und im Sommer um 2 bis 3 Grad Celsius. Das gilt für ländliche wie städtische Gebiete gleichermaßen: Überall wird es mehr Sommertage und heiße Tage (mit einer Höchsttemperatur von mindestens 25 beziehungsweise 30 Grad Celsius) sowie mehr Tropennächte geben (in denen die Temperatur über 20 Grad bleibt). Ihre Zahl erhöht sich – wie bisher schon – in den Städten durch den Wärmeinseleffekt entsprechend, etwa in Frankfurt um zehn Sommertage.

Dem lässt sich nur durch Umbaumaßnahmen begegnen. Eine solche Anpassung erscheint umso sinnvoller und dringender, als Gebäude typischerweise ein halbes Jahrhundert

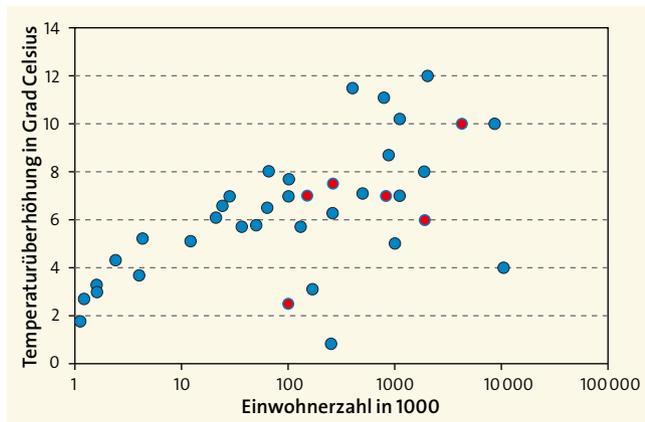
bis zur nächsten grundlegenden Sanierung oder ihrem Abriss bestehen bleiben. Alle heutigen Maßnahmen haben mithin sehr langfristige Auswirkungen. Eine bessere Wärmedämmung spart also nicht nur Energie, sondern zahlt sich auch als vorbeugende Maßnahme für das zukünftige Stadtklima aus.

Für vorausschauende Anpassungsmaßnahmen beim Städtebau lassen sich einige einfache Grundregeln formulieren. Generell empfiehlt es sich, die natürlichen Bodeneigenschaften weitestgehend zu bewahren – das heißt möglichst wenig Fläche zu versiegeln, ein Maximum an Regenwasser in der Stadt zurückzuhalten und das Grün gleichmäßig zu verteilen. Wie sich diese allgemeinen Ratschläge am besten umsetzen lassen, ist weniger klar. So gibt es noch keine gesicherten Erkenntnisse darüber, wie hoch Gebäude maximal sein und welchen Abstand sie voneinander haben sollten. Einiges ist immerhin bekannt. Untersuchungen haben übereinstimmend ergeben, dass der Einfluss einer Grünfläche allenfalls wenige 100 Meter weit reicht. Deshalb sollte eine Stadt nicht nur einzelne isolierte Parks enthalten, sondern durchweg begrünt sein. Bäume am Straßenrand sind ein Anfang. Allerdings dürfen sie nicht die Durchlüftung behindern, wodurch sich Schadstoffe anreichern würden. Ein anderes Mittel, um die Stadt nachts zu kühlen, ist die Begrünung von Dächern. In diesem Fall muss jedoch für ausreichende Bewässerung gesorgt sein, damit die Pflanzen keinen Trockenstress erleiden, der die positiven Effekte zunichtemachen würde.

Wohin mit dem Regenwasser?

Die meisten Menschen mögen keinen Regen, aber Stadtbewohner hegen meist eine besonders große Abneigung dagegen. Ein Grund dafür sind die böigen Winde in den Straßenschluchten, die den Umgang mit Regenschirmen zum Abenteuer machen können. Hinzu kommt die Gefahr der Überflutung von Gehwegen, Straßen und Kellern, vor allem als Folge von Extremniederschlägen. Um das zu verhindern, versuchen die Städte Regenwasser möglichst umgehend in Siele zu leiten. Dadurch geht aber potenzielles Grundwasser verloren, das der städtischen Vegetation fehlen wird, wenn im Zuge des Klimawandels im Sommer vermehrt Hitze- und Trockenperioden auftreten, wie regionale Klimamodelle vermuten lassen. Inzwischen sind viele Städte deshalb dazu übergegangen, Niederschlagswasser zumindest teilweise zurückzuhalten, zum Beispiel über eine Dachbegrünung oder Parkplätze mit Rasengittersteinen (Bild rechts oben). Eine gesteigerte Verdunstung durch die Vegetation sollte kühlend wirken, so dass sich der Wärmeinseleffekt abschwächt.

Von regionalen Änderungen des Niederschlags als Folge der Erderwärmung sind Stadt und Land gleichermaßen be-



K. HEINKE SCHLÜNZEN



Parkplätze mit Rasengittersteinen können Niederschläge aufnehmen. Weil durch die Vegetation mehr Wasser verdunstet, schwächen sie zudem den Wärmeinseleffekt von Städten ab.

troffen. Heutige Starkniederschlagsmengen werden nach dem A1B-Szenario in Deutschland bis Ende des Jahrhunderts vermutlich um etwa zehn Prozent häufiger auftreten. Das sollte bei der Planung von Sielen und Sickerflächen bedacht werden. Zu berücksichtigen ist auch, dass Städte die Niederschlagsverteilung beeinflussen. Auf der windzugewandten Seite zwingen sie nämlich die Luft zum Aufsteigen. Das verstärkt die Wolkenbildung und erhöht die Niederschlagsneigung auf der windabgewandten Seite.

Diesen Effekt haben Forscher schon bei verschiedenen Städten nachgewiesen. Ob der Niederschlag im Stadttinneren bereits zunimmt oder erst außerhalb, hängt von den lokalen topografischen Gegebenheiten und der aktuellen meteorologischen Situation ab. Aber auch die Stadtgröße spielt eine Rolle. Je ausgedehnter eine Stadt ist, desto mehr von dem leeseitig erhöhten Niederschlag fällt in ihr selbst. Das hat mein Mitarbeiter Peter Hoffmann 2009 in einer idealisierten Studie gezeigt. In Hamburg tritt nach Untersuchungen meiner Gruppe bei fast allen Windrichtungen verstärkter Lee-Niederschlag auf. Eine Ausnahme bilden nur Nordostwinde – vermutlich wegen topografischer Effekte.

Auf Grund ihrer Schadstoffemissionen können Städte aber auch für weniger Niederschläge sorgen. Insbesondere Schwefel- und Stickoxide sowie Ammoniak bilden in der Luft Aerosole. Diese Schwebeteilchen wirken als Kondensationskeime für Wassertröpfchen. Da ihre Konzentration über dem Stadtgebiet hoch ist, entstehen viele solche Tröpfchen, die um den vorhandenen Wasserdampf konkurrieren. Deshalb bleiben sie klein und zu leicht, um zu Boden zu fallen. Durch die Aerosole intensiviert sich also zwar die Wolkenbildung, aber es regnet in den leeseitigen Bereichen einer Stadt weniger.

Wir haben es folglich mit zwei gegensätzlichen Effekten zu tun. Während eine Stadt durch ihre Topografie die Niederschläge in leeseitigen Gebieten verstärkt, schwächt sie sie we-

gen ihrer Emissionen zugleich ab. Welcher Vorgang überwiegt, muss in jedem Fall einzeln untersucht werden. Für die Zukunft ist damit zu rechnen, dass der vom Menschen verursachte Schadstoffausstoß weiter zurückgeht. Damit verringert sich der Abschwächungseffekt, und die leeseitigen Niederschläge sollten zunehmen. Durch die globale Erwärmung ändern sich allerdings möglicherweise auch die Windstärken und -richtungen – und damit die Stadtteile, die im Windschatten liegen. Auskunft darüber können Simulationen mit regionalen Klimamodellen geben.

Obwohl schon seit Langem bekannt ist, dass Städte ein eigenes Klima aufweisen, bleibt noch viel zu erforschen. Dabei gilt es, die eher qualitativen Aussagen mit konkreten Zahlen zu unterfüttern, die Beobachtungen zu quantifizieren und die Schlussfolgerungen statistisch abzusichern. Städte sind von Menschen gemacht, und die Art ihrer Bebauung und Strukturierung ist es, die das Regionalklima derart modifiziert, dass es zum kleinräumigen heterogenen Stadtklima wird. Deshalb besteht grundsätzlich die Möglichkeit zum Eingreifen und zur Verbesserung der gegenwärtigen Situation. Gebäude werden regelmäßig saniert oder sogar ersetzt. Die Umstrukturierung von Städten mit dem Ziel, das lokale Klima angenehmer zu gestalten, ist daher nicht zwangsläufig mit hohen Kosten verbunden. Zugleich kann sie negativen Auswirkungen der Erderwärmung beizeiten vorbeugen. ~

DIE AUTORIN



KLIMACAMPUS UHHH /
FOTO: D. AUSSERHOFFER

K. Heike Schlünzen ist Professorin für Meteorologie an der Universität Hamburg. Als Leiterin der Arbeitsgruppe »Meso- und mikroskalige Vorgänge und Phänomene« forscht sie über kleinräumige Vorgänge in der Atmosphäre.

QUELLEN

- Allen, L. et al.:** Global to City Scale Urban Anthropogenic Heat Flux: Model and Variability. In: International Journal of Climatology 31, S. 1990–2005, 15. 11. 2011
- Früh, B. et al.:** Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237, Offenbach 2011
- Hoffmann, P.:** Modifikation von Starkniederschlägen durch urbane Gebiete. Diplomarbeit Meteorologie, Universität Hamburg 2009
- Hoffmann, P. et al.:** A Statistical Model for the Urban Heat Island and its Application to a Climate Change Scenario. In: International Journal of Climatology, in Druck. doi: 10.1002/joc.2348
- Rudolf, E.:** Untersuchung von Starkniederschlägen der ENSEMBLES Regionalmodelle in der Metropolregion Hamburg. Bachelorarbeit Meteorologie, Universität Hamburg 2011
- Schlünzen, K. H. et al.:** Long-Term Changes and Regional Differences in Temperature and Precipitation in the Metropolitan Area of Hamburg. In: International Journal of Climatology 30, S. 1121–1136, 30. 6. 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142728

So haben Sie Wissenschaft noch nie gesehen ...



Superschnell dank Haifischhaut?

Ingenieur Björn Feldhaus will Flugzeuge Treibstoff sparend bauen – indem er die Struktur von Haifischhaut auf Triebwerkschaufeln nachbildet.

www.sciencemovies.de

science
movies
.....

Acht spannende Forschungsprojekte
der VolkswagenStiftung als Videoblog