

## Houses of the Future Häuser der Zukunft

Behrokh Khoshnevis

**Contour Crafting (CC)** is a computer-automated construction technology, invented and developed at USC to deliver rapid production, ease of use, significant reduction of waste, and other substantial cost savings. Not only will CC have a significant impact on the point of delivery, but the whole support structure will be similarly affected by the technology. Substantial revenues for a wide variety of direct users of the technology and its suppliers are anticipated. In addition to the enormous economic potential, CC has been designed to deliver improved quality of life, superior safety, and beneficial environmental impact. In this sense, CC will enable the construction of custom-designed, low-cost housing with a level of quality heretofore unobtainable. Further, safety elements inherent in the process will significantly reduce the rate of on-the-job injuries that are so prevalent in the construction industry today, thereby lowering the costs of litigation, insurance, and medical treatment, to say nothing of saving lives. The environmental impact will also be significant through energy savings for construction and the near-elimination of waste products. In the long run, CC has the potential to revolutionize the construction industry.

Fact: It currently takes six to nine months to construct an average house in the US.

- CC promises custom-designed houses completed in one day.

Fact: Nearly 30 million U.S. households face cost burdens, overcrowding, and/or space inadequacy. While large cities in developing countries are growing at rates nearing 5% per year, slums and squatter settlements have been growing nearly twice as fast.

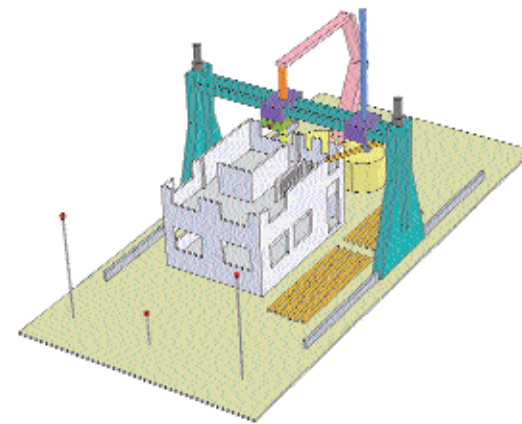
- CC can provide dignified and affordable housing constructed for low-income populations.

Fact: It can take several months or years before disaster victims are placed in permanent housing.

- Comfortable and livable emergency shelters (not tents) may be constructed rapidly by CC for long-term use.

Fact: Construction contributes significantly to harmful emissions and construction of a typical single-family home generates a waste stream of about 3 to 7 tons. Globally, more than 40% by weight (amounting to three billion tons) of all raw materials are consumed in construction.

- CC offers construction without waste, noise, dust, or harmful emission.



Fact: 400,000 workers are seriously injured or killed in construction annually in the US.

- CC can deliver construction without accidents, injuries, or litigation.

Fact: Any departure from standard rectilinear design significantly increases the cost of conventional construction.

- New architectural designs for homes, neighborhoods and cities without attendant increases in cost may be made possible by CC.

What can be only imagined today may be realized in the near future by CC. This revolutionary technology uses modern robotics in combination with a construction tool used since ancient times i.e., the trowel, to build a custom-designed house in a few hours. A full implementation of the technology will have the potential to significantly improve the urban housing infrastructure in the world, by providing much higher quality construction at much lower cost. At present, CC would be most useful for emergency reconstruction by disaster and relief agencies working in third world nations devastated by earthquakes, floods, other natural disasters and war. Implementation of this breakthrough technology in the US is complicated by prevailing policies that regulate labor, zoning, and land costs. Nevertheless, the availability of this new technology has the potential to change the building industry in the US and other developed countries.

With US construction-related expenditures currently totaling \$300 billion in the public sector and \$677 billion in the for-profit sector annually, the potential impact of the CC technology is nothing short of astounding. Although residential construction may be the most important application of CC, the technology can be effectively used to fabricate large public art and in extraterrestrial construction. At this point CC seems to be the best candidate for building structures on the Moon and Mars, which are being targeted for human colonization by the end of the current century. A project entitled Lunar Contour

Crafting has already started at NASA Marshall Space Flight Center with the target of testing the CC technology on the lunar soil within the next decade.

**The CC Technology:** CC is a hybrid fabrication method that combines an extrusion process for forming object surfaces and a filling process to build the object core in layered fashion. The extrusion nozzle used to create structural elements has multiple outlets, one for each side, and others for the inner (core) of a wall structure. Each side orifice has an adjacent trowel. As the material is extruded, the traversal of the trowels creates smooth (2 micron has been achieved) outer and top surfaces on each layer. The nozzle can be deflected to create non-orthogonal surfaces such



**Matthias Sauerbruch;**  
**Sauerbruch und Hutton**  
**Architekten, Berlin**  
(Industrielle Herstellungstechniken)

Dass, wenn man noch mal über diesen Versuch spricht, Architektur und künstlerische Sensibilität oder künstlerische Arbeitsweisen oder wie auch immer zusammen zu bringen. Das sind natürlich viele dieser Thesen, die damals vertreten worden sind, nämlich industrielles Bauen mit einem sehr hohen Anspruch umzusetzen, erst heute wirklich realisierbar sind. Heute ist ein Zeitpunkt, wo industrielle Herstellungstechniken ein anderes Niveau erreicht haben, wo es nicht mehr um Repetition und endlose Aneinanderreihung immer gleicher Teile geht, sondern wo eben durch computergesteuerte Herstellungstechnologien das **Mass-Customisation**, also als Stichwort praktisch die industrielle Herstellung von einzelnen Teilen wirklich machbar ist.

as domes and vaults. Co-extrusion of multiple materials is also possible. For example, plaster as the outer surface material and concrete as the core structural material may be co-extruded by the CC nozzle.

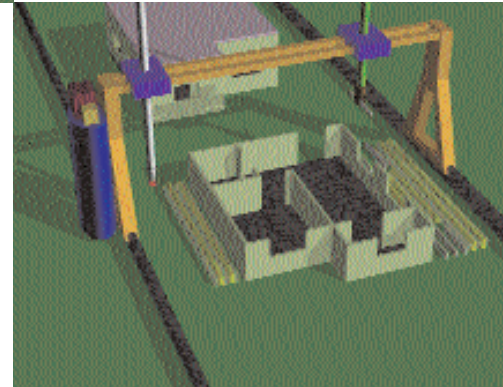
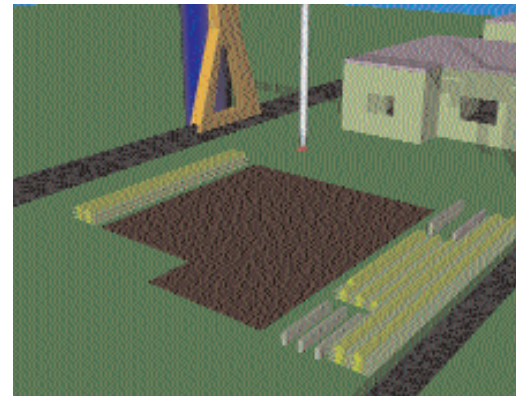
Early developments have been on a small scale but reveal the potential of CC in building construction through successful experimentation with (among others) clay, plaster and concrete. Our research team, a collaboration between faculty from the Schools of Engineering, Architecture, Fine Arts, Policy, Planning and Development, and Letters, Arts and Sciences, has also produced various geometrical shapes with a variety of materials. And we are currently creating and testing full-scale concrete wall sections for conformance to building codes. Future developments of the technology are projected in the following three research phases:

**Phase I.** The basic CC technology will be developed for automated construction of single-residence structures where a gantry system carrying the CC nozzle and other robotic arms moves on two parallel lanes installed at the construction site. A single house or a colony of houses could easily be constructed in a single run. Integration of the CC machine with a support-beam picking and positioning arm could produce conventional structures, while organic form (e.g., adobe) structures could be built without external support elements by using shape features such as domes and vaults. In this phase, we also plan to develop both a smaller machine dedicated to construction of artistic structures as well as integrated automatic embedding of reinforcement materials.

**Phase II.** CC technology will be developed for construction of larger community and multi-residence structures. For apartment buildings, hospitals, schools and government buildings, for example, the overhead gantry platform could be extended above the width of the structures and equipped with multiple cross members each holding a CC nozzle assembly and a robotic manipulator (for beam installation, plumbing, etc.). The integrated construction system in Phase II will also include automatic methods for tiling, plumbing, electrical and communication network wiring, and painting. Degussa AG, the largest producer of construction chemicals, will conduct concurrent materials development research at their laboratories.

**Phase III.** In this phase, we will pursue the following implementation issues:

- Adaptation of CC for the construction of entire communities, including residential, public, and commercial buildings, as well as certain infra-structures such as pavements, landscapes, water reservoirs, etc. We will explore innovative designs, such as fractal communities.
- While we will use the technology for low-income housing in underdeveloped countries almost immediately after its development, we will also address local building codes for commercial deployment of CC in the US.



- Due mainly to unprecedented speed of construction, CC will require attendant improvements in the construction inspection process. Therefore, we plan to develop advanced sensory systems and information technologies for automated real-time inspection and feedback to municipal computers overseeing ongoing CC construction activities at various locations.

- Creation of necessary information technologies for construction project management for the new technology is crucial. Material procurement is especially important for CC, as all needed materials must become available at the site in a relatively short period of time. We will develop the needed project management software, communications systems, and supply-chain logistics for effective implementation of the technology on a major scale.

USC's focus on finding solutions to complex urban problems is reflected in the CC research team's guiding principles:

- Maximum flexibility for architectural design. Buildings constructed with CC, though inexpensive, can be of high visual and aesthetic quality and can, therefore, provide a significant level of dignity to low-income residents.
- Ultimate friendliness to the environment due to wasteless operation and low energy usage.
- Simplicity of construction logistics and management.
- Dramatic impact on cost and speed (a 2000 sq.ft. two-story house may be built

within a day)

- Adaptable application of in-situ (e.g. indigenous) materials. CC has an immediate application in emergency shelter construction.

Contour Crafting (CC) ist eine computerisierte Konstruktionstechnologie, die an der University of Southern California erfunden und entwickelt wurde, um im Baugewerbe eine höhere Produktionsrate, einfache Anwendung, deutliche Reduzierung von Abfällen und weitere substanzielle Kosteneinsparungen zu erreichen. Dabei wird CC nicht nur Einfluss auf die Art der Produktion haben, sondern auch die Tragwerkskonstruktion beeinflussen und lässt damit hohe

Gewinne die direkten Anwender sowie ihre Zulieferer erwarten. Zusätzlich zu dem enormen ökonomischen Potential wurde CC mit Blick auf eine verbesserte Lebensqualität, erhöhte Sicherheit und eine positive Auswirkung auf die Umwelt entwickelt. In diesem Sinn wird CC den Bau maßgeschneiderten, preiswerten Wohnraums von bisher unerreichter Qualität ermöglichen. Außerdem werden in den Produktionsprozess eingebaute Sicherheitsmaßnahmen die heute noch so hohe Verletzungsrate auf Baustellen drastisch senken und damit zugleich die Kosten für Rechtsstreitigkeiten, Versicherungen und medizinische Versorgung senken – nicht zu reden von Menschenleben, die gerettet werden können. Die positiven Folgen für die Umwelt werden ebenfalls bedeutend sein, da der Energieaufwand für den Bau gesenkt wird und kaum noch Abfallprodukte entstehen. Auf lange Sicht hat CC das Potential, die Bauindustrie zu revolutionieren.

Tatsache: Derzeit dauert der Bau eines normalen Hauses in den USA sechs bis neun Monate.

- CC verspricht maßgeschneiderte Häuser, die an einem Tag fertig gestellt werden.

Tatsache: Fast 30 Millionen US-Haushalte müssen sich mit hohen Kosten, zu vielen Bewohnern in einem Haus und/oder räumlicher Enge auseinandersetzen. Während große Städte in Entwicklungsländern um fast 5 % jährlich wachsen, wachsen Slums mit beinahe doppelter Geschwindigkeit.

- CC kann menschenwürdigen und erschwinglichen Wohnraum für einkommensschwache Bevölkerungsgruppen bereitstellen.

Tatsache: Es kann Monate oder Jahre dauern, bis die Opfer von Katastrophen wieder in dauerhaften Wohnungen untergebracht werden.

- Mit CC können bequeme und wohnliche Notunterkünfte (keine Zelte) schnell und für langfristige Einsätze errichtet werden.

Tatsache: Bautätigkeit trägt entscheidend zu gefährlichen Emissionen bei; beim Bau eines typischen Einfamilienhauses fallen etwa 3 bis 7 Tonnen Abfallprodukte an. Weltweit werden für das Bauen etwa 40 % – gemessen am Gewicht (insgesamt 3 Milliarden Tonnen) – aller Rohstoffe aufgewandt.

- CC ermöglicht das Bauen ohne Abfallprodukte, Lärm, Staub oder gefährliche Umweltbelastungen.

Tatsache: 400 000 Bauarbeiter werden in den USA jährlich bei der Arbeit ernsthaft verletzt oder getötet.

- Mit CC kann es Baustellen ohne Unfälle, Verletzungen und Rechtsstreitigkeiten geben.

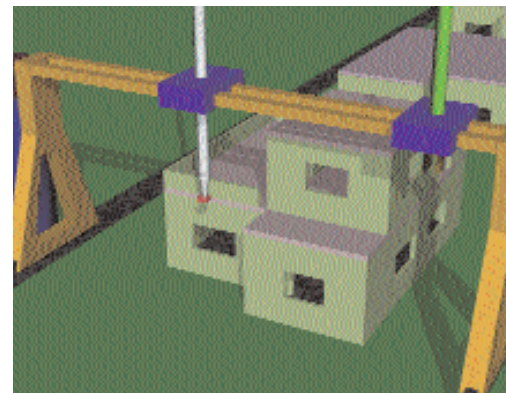
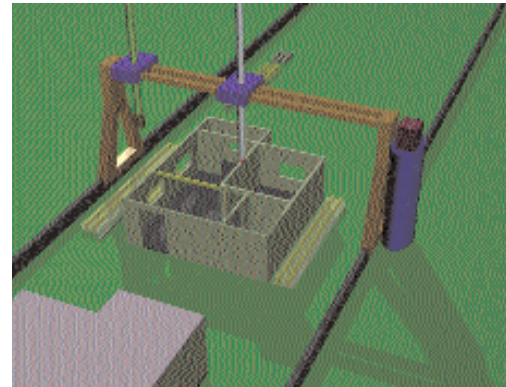
Tatsache: Jede Hausform, die deutlich vom standardisierten, rechteckigen Grundriss abweicht, ist bei der konventionellen Art des Bauens deutlich teurer.

- CC kann neue architektonische Entwürfe für Häuser, Siedlungen und Städte ohne Mehrkosten ermöglichen.

Was man sich heute nur vorstellen kann, könnte in naher Zukunft mithilfe von CC Realität werden. Diese revolutionäre Technik benutzt moderne Robotertechnologie in

Kombination mit einem Bauwerkzeug, das schon im Altertum in Gebrauch war, der Maurerkelle nämlich, um in wenigen Stunden ein individuell entworfenes Haus zu errichten. Ein umfassender Einsatz dieser Technologie wird die städtische Infrastruktur weltweit signifikant verbessern, indem sie eine viel hochwertigere Bauqualität zu einem viel niedrigeren Preis bereitstellt. Derzeit könnte CC am sinnvollsten von Hilfsorganisationen für den Bau von Notunterkünften in Entwicklungsländern eingesetzt werden, die von Erdbeben, Überschwemmungen, anderen Naturkatastrophen oder Kriegen heimgesucht wurden. Ein Einsatz dieser sensationellen Technologie in den USA wird durch die vorherrschenden Regelungen wie Arbeitsbestimmungen, Parzellierung und Landpreise kompliziert. Dennoch steckt in der Verfügbarkeit dieser neuen Technik das Potential, die Bauindustrie in den USA und anderen Industrienationen zu verändern.

In den USA liegen die Ausgaben für Bauprojekte zurzeit bei 300 Milliarden Dollar im öffentlichen Sektor und bei 677 Milliarden Dollar am freien Markt. In diesem Zusammenhang



sind die Möglichkeiten, die CC eröffnet, ausgesprochen verblüffend. Obwohl der Bau von Wohnungen vermutlich das wichtigste Einsatzgebiet von CC ist, kann die Technologie auch effektiv für die Konstruktion z. B. von großen Kunstwerken im öffentlichen Raum oder zum Bau extraterrestrischer Bauten eingesetzt werden. Derzeit erscheint CC als die beste Methode, um auf dem Mond oder dem Mars zu bauen, auf denen bis zum Ende dieses Jahrhunderts die ersten Kolonien entstehen sollen. Ein Projekt mit dem Namen „Lunar Contour Crafting“ wurde im NASA Marshall Space Flight Center bereits begonnen. Dabei soll CC noch

innerhalb dieses Jahrzehnts auf der Mondoberfläche getestet werden.

Die CC-Technologie: CC ist eine gemischte Fabrikationsmethode, die einen Gussvorgang zum Formen von Objekt-oberflächen mit einem Füllvorgang für das schichtweise Ausfüllen von Zwischenräumen verbindet. Die Düse, mit der Strukturen geformt werden, ist mit mehreren Öffnungen versehen: einer für jede Seite sowie einer zum Ausfüllen von Hohlräumen. Neben jeder seitlichen Öffnung ist eine Kelle angebracht. Das Material wird aus der Düse gepresst und von der darüber gleitenden Kelle geglättet (2 Micron konnten erreicht werden). So erhält jede aufge-

brachte Schicht eine glatte Oberfläche. Die Düse kann so gelenkt werden, dass sie auch nicht-rechtwinklige Strukturen wie Kuppeln oder Gewölbe formen kann. Auch können mehrere Materialien gleichzeitig ausgebracht werden. So kann die CC-Düse z.B. Putz auf die Oberfläche einer Wand aufbringen, während sie gleichzeitig den Wandhohlraum mit Beton ausgießt.

Die ersten Entwicklungsschritte fanden im kleinen Rahmen statt, lassen aber das Potential von CC in der Baukonstruktion durch erfolgreiche Experimente u. a. mit Ton, Gips und Beton erkennen. Unser Forschungsteam, an dem Universitätsmitarbeiter aus den Bereichen Ingenieurwissenschaften, Architektur, Kunst, Entwicklungshilfe sowie Geistes- und Naturwissenschaften beteiligt sind, hat auch unterschiedliche geometrische Formen aus verschiedenen Materialien hergestellt. Wir entwickeln und testen zurzeit maßstabsgerechte Betonwände, die den Anforderungen der Baubestimmungen genügen. Weitere Entwicklungen dieser Technologie sollen in den folgenden drei Forschungsphasen erreicht werden:

**Phase I** Die grundlegende CC-Technologie wird für den automatisierten Bau eines Einfamilienhauses entwickelt werden, wobei ein Brückenkrane die CC-Düse trägt und sich andere Roboterarme auf zwei parallel verlaufenden Bahnen entlang der Baustelle bewegen. Ein einzelnes Haus oder eine Anzahl von Häusern könnte so in einem Arbeitsgang gebaut werden. Die Verbindung der CC-Düse mit einem Arm, der Deckenträger anhebt und in Position bringt, könnte zur Errichtung konventioneller Bauformen dienen, während Strukturen mit organischen Formen (z.B. Adobe) ohne äußere Stützelemente als Kuppeln, Bögen oder Gewölbe gebaut werden könnten. In dieser Phase wollen wir auch eine kleinere Maschine entwickeln, die künstlerische Elemente produzieren soll, sowie die automatisierte Einbringung von Stützmaterialien sicherstellen.

**Phase II** Die CC-Technologie wird für den Bau größerer Siedlungen und Mehrfamilienhäuser entwickelt. Für Mehrfamilienhäuser, Krankenhäuser, Schulen und Verwaltungsgebäude z.B.



würde der Brückenkran über die gesamte Breite der Baufläche durch eine Rahmenkonstruktion erweitert, die mit Querverbindungen ausgestattet ist, von denen jede eine CC-Düse und einen Roboterarm für das Verlegen von Deckenträgern, Rohren u. Ä. trägt. Das integrierte Konstruktionssystem wird in Phase II auch über automatische Verfahren zum Verlegen von Fliesen, für Klempnerarbeiten, das Verlegen von Kabeln für die Stromversorgung und Kommunikationstechnologien und das Anstreichen verfügen. Die Degussa AG, die größte Produzentin von Bauchemikalien, wird in ihren Laboratorien gleichzeitig geeignete Materialien entwickeln.

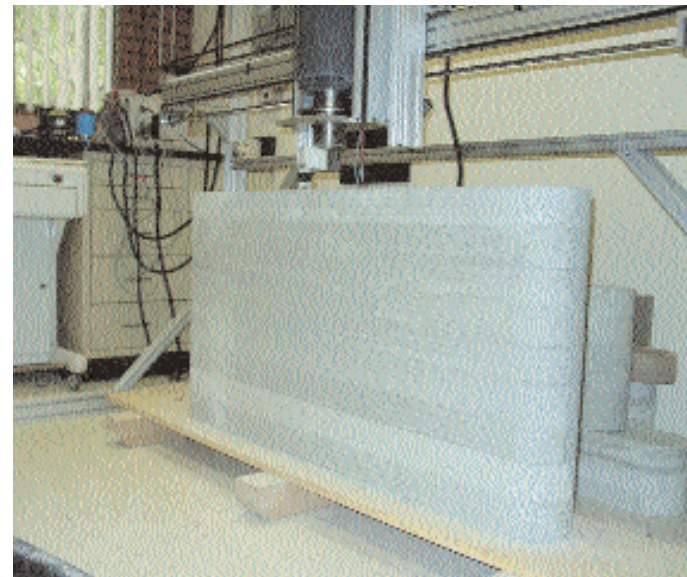
**Phase III** In dieser Phase wollen wir die folgenden Bereiche in die Praxis umsetzen:

- Anpassung von CC für den Bau ganzer Gemeinden inklusive Wohnhäuser, öffentlicher und gewerblicher Bauten sowie verschiedener Infrastrukturen wie Straßenbeläge, Landschaftsgestaltung und Wasserbecken. Wir werden uns mit innovativen Entwürfen beschäftigen, z.B. mit fraktalen Gemeinden.
- Während wir die Technologie möglichst sobald sie ausgereift ist, in Entwicklungsländern für den Bau von Sozialwohnungen einsetzen werden, wollen wir uns auch mit den Baubestimmungen in den USA befassen, um CC dort kommerziell einsetzen zu können.
- Weil CC mit einer nie zuvor erreichten Baugeschwindigkeit arbeiten wird, müssen zugleich Verbesserungen des Bauinspektionsprozesses erreicht werden. Dazu wollen wir ein fortschrittliches sensorisches System und eine Informationstechnologie entwerfen, mit deren Hilfe der Bau während seiner Entstehung automatisch begutachtet und das Feedback unmittelbar an die städtischen Computer weitergegeben wird, die für die Aufsicht über die laufenden CC-Bauprojekte an unterschiedlichen Orten eingesetzt werden.
- Die Entwicklung der nötigen Informationstechnologie für die Bauleitung ist essenziell. Die Bereitstellung von Material ist für CC von äußerster Wichtigkeit, da alle benötigten Materialien

in relativ kurzer Zeit an der Baustelle angeliefert werden müssen. Wir werden die notwendige Projektmanagementsoftware, Kommunikationssysteme und die Versorgungslogistik im Sinne einer effektiven Einführung der Technologie im großen Rahmen entwickeln.

Die Zielsetzung der University of Southern California, Lösungen für komplexe urbane Probleme zu finden, spiegelt sich in den Leitsätzen des CC-Forschungsteams wider:

- Maximale Flexibilität für den architektonischen Entwurf. Gebäude, die mit CC gebaut werden, können sich trotz der niedrigen Kosten durch hohe visuelle und ästhetische Qualität auszeichnen und damit auch der einkommensschwachen Bevölkerung menschenwürdige Wohnverhältnisse bieten.
- Ultimative Umweltfreundlichkeit dank abfallfreien Bauens und niedrigem Energieverbrauch.
- Einfachheit der Bauleitung und -leitung.
- Dramatische Auswirkungen auf Baukosten und -zeit (ein Haus von 220 m<sup>2</sup> Fläche auf zwei Etagen kann innerhalb eines Tages gebaut werden).
- Anpassungsfähiger Einsatz von vor Ort vorhandenen (heimischen) Materialien. CC ist für den unmittelbaren Bau von Notunterkünften geeignet.



Robot builds Wall  
Ein Roboter baut eine Wand