

Baurobotik

Robotik-gestützter Bau des 634 Meter hohen erdbebensicheren Tokyo Sky Tree

Mehr als 2.000 Erdbeben bzw. 60% der weltweiten Erdbeben und 30% der Tsunamis treten in Japan auf. Wie das Erdbeben im März 2011 (Stärke 9,0) ein weiteres Mal bewies, hat Japan hochmoderne Technologien für erdbebensicheres Bauen entwickelt. Das seit über 1.300 Jahren weltweit vierstärkste Erdbeben verschob Japan über 2 Meter nach Osten, die Erdachse neigte sich um 10 Grad und rief einen verheerenden Tsunami hervor. Dennoch trat auf der laufenden Baustelle des Sky Tree kein Schaden auf. Obwohl das Erdbebenschwingsdämpfungssystem, das hier beschrieben wird, sich noch im Bau befindet.

Besonders Gebäude in Tokio und Umgebung müssen jährlich etliche hundert kleinere und größere Beben überstehen, ohne an Konstruktion, Bauelementen oder technischer Gebäudeausrüstung Schaden zu nehmen. Mit einer Höhe von 634 Metern ist der Tokyo Sky Tree (Tokyo Sukai Tsuru) das zweitgrößte von Menschen erstellte Bauwerk der Erde. Trotzdem ist der Turm eines der sichersten Gebäude, das je gebaut wurde. Dies ist möglich geworden durch die Verbindung von

- innovativem Design,
- integrierter und Erdbebensicherheit garantierender Technologie und
- robotergestützten Bauprozessen.

Innovatives Design

Die Form des Turms ist das Ergebnis der Überlagerung etlicher Erfordernisse hinsichtlich Stabilität, Funktion, Herstellungsanforderungen und Erscheinung, welche zu einem komplexen Satz an Entwurfsparametern führt, die aufeinander abgestimmt werden mussten. Vom Boden bis zur Spitze ändert er mehrmals die Form, trotzdem erscheint er als eine wohlgestaltete Einheit (Bild 1). Bis zu ca. 50 Metern Höhe ruht der Turm auf einem Tragwerk, ähnlich einem Dreibein, das es erlaubt, die Kräfte

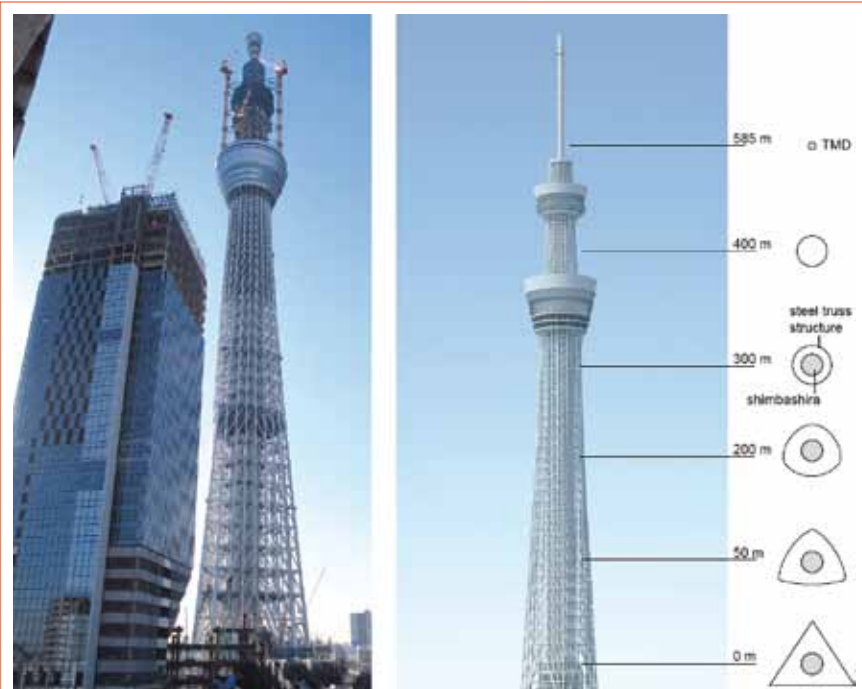


Bild 1: Vom Boden bis zur Spitze ändert der Turm mehrmals seine Form, um verbesserte Eigenschaften zu erreichen, trotzdem erscheint er als eine wohlgestaltete Einheit.

te des Bauwerks auf konzentrierte und optimierte Weise in die Fundamente zu leiten. Zwischen 50 und 200 Metern Höhe stellt eine dreieckige Struktur die Stabilisierung bei horizontal angreifenden Kräften sicher. Oberhalb von 200 Metern geht die dreieckige Struktur nahtlos in eine runde Struktur über, um den Einfluss horizontaler Windkräfte auf den Turm zu verringern.

In der Höhe von 350 Metern und 450 Metern legen sich kegelförmige Ringe um das dünnere Tragwerk des Turms. Sie beinhalten nicht nur Restaurant und Observationseinrichtungen, sondern unterstützen auch die Stabilität und Balance des Turms. Vor allem erlaubt diese strukturelle Gestaltung eine Modularisierung in höchst stabile fabrikgefertigte und großformatige Stahlsegmente. Um die Arbeitsbelastung zu reduzieren und die Präzision der Verbindungen zu erhöhen, waren wichtige Verbindungselemente an den meisten Bauteilen vorinstalliert.

Das Zentrum des Turms ist als Schaft aus Beton gefertigt, der Dienste wie Aufzüge und Leitungskanäle beinhaltet. Die hochentwickelte digitale und analoge Technologie zur Schwingungsdämpfung, abgeleitet von der traditionellen Baumethode „Shimbashira-Seishin“, stellt die Aufnahme von Vibrationen bei etlichen hundert Erdbeben pro Jahr in Tokio sicher.

Neue Dimension im erdbebensicheren Bauen

Die bewährte Technologie „Shimbashira-Seishin“, die bei den traditionellen japanischen Pagoden eingesetzt worden war, funktioniert durch einen zentralen Mittelpfeiler, der die Vibrationen aufnimmt. Diese Methode wurde auf den Tokyo Sky Tree übertragen und durch eine Kombination mit anderen passiven und aktiven Schwingungskontrollsystemen verbessert.

Pagoden sind mehrstöckige, turmähnliche Gebäude, die man in Vietnam, Chi-

na, Korea (wo sie überwiegend in Stein gebaut wurden) und Japan (reine Holzbauweise) vorfindet. Zu Beginn wurden Pagoden hauptsächlich zur sicheren Verwahrung von Knochen und anderen sterblichen Überresten von bekannten buddhistischen Mönchen verwendet. Später fanden sie allgemeinere Verwendung und wurden Teil der architektonischen Kultur, vor allem in China. In Japan ist die Pagode immer noch ein zentrales Element in Gebieten um Tempel und Heiligenschreine. Wie Studien zeigen, ist „Shimbashira-Seishin“ ein typisches Element der japanischen Pagoden, die regelmäßig Erdbeben ausgesetzt sind. „Shimbashira-Seishin“ gibt es allerdings nicht in China und Korea, da die Pagoden dort nicht oder zumindest nicht regelmäßig von Erdbeben betroffen sind.

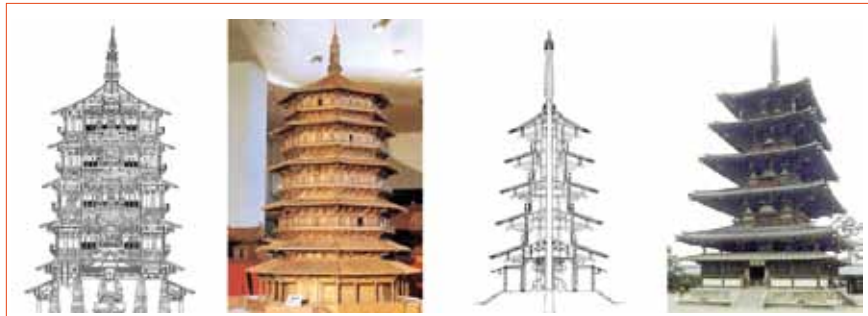
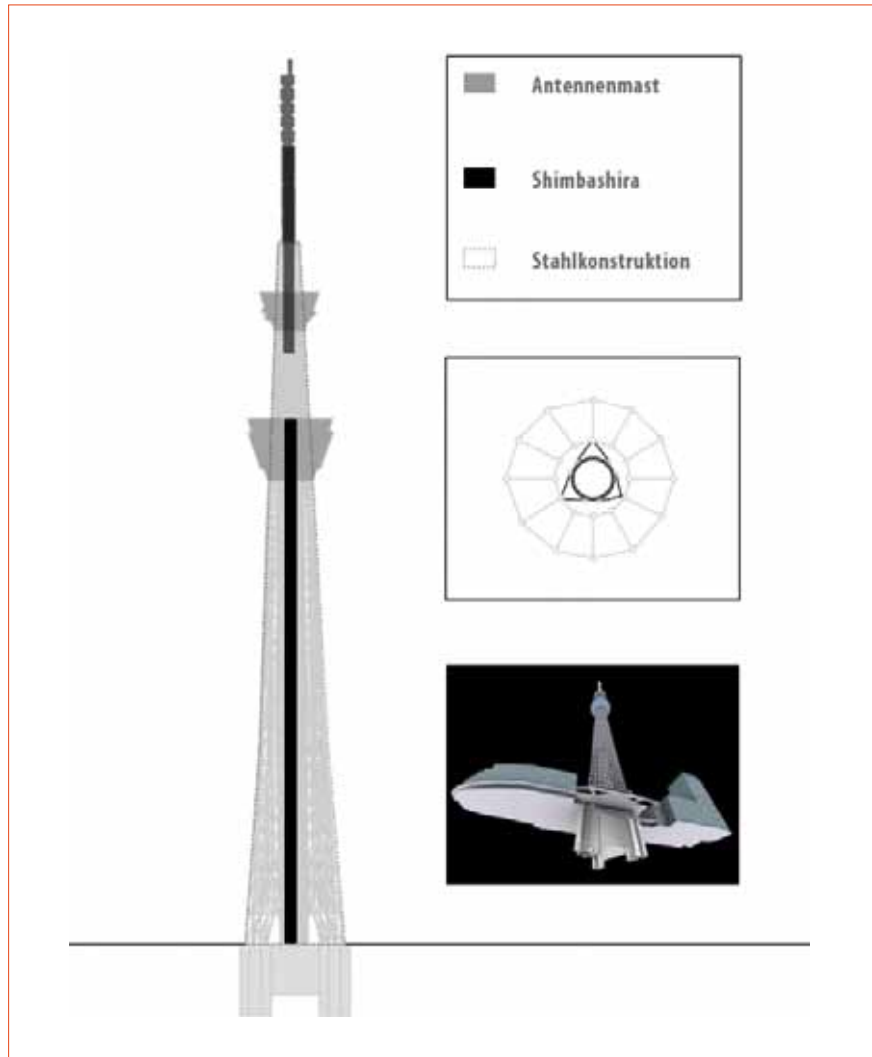


Bild 2: Studien zeigen, dass der „Shimbashira“ ein typisches Element der japanischen Pagoden ist, die regelmäßig Erdbeben ausgesetzt sind. „Shimbashira-Seishin“ gibt es allerdings nicht in China und Korea, da die Pagoden dort nicht oder zumindest nicht regelmäßig von Erdbeben betroffen sind. Links: Chinesische Pagoden ohne „Shimbashira“. Rechts: Japanische Pagoden mit „Shimbashira“.

© Prof. Suematsu, Nagoya

Der Tokyo Sky Tree ist dabei keine Nachahmung des „Shimbashira“-Prinzips der Pagoden, sondern eine kom-

plexe Neuinterpretation, die mit einer Vielzahl hochmoderner Techniken verbunden worden ist. Im Allgemeinen ist es ein mehrfach segmentiertes System, das es den einzelnen Bausteinen erlaubt, auf die Vibrationen unterschiedlich zu reagieren. An verschiedenen Stellen des Bauwerks muss anders auf die Schwingungen reagiert werden. Dafür ist der bewehrte Betonkern von der äußeren Stahlstruktur entkoppelt und der Antennenmast an der Spitze ist vom inneren Betonkern („Shimbashira“) darunter entkoppelt. Daher spricht man von drei unabhängigen Bauteilen. Die Art und Weise und Stärke der Verbindung zwischen dem inneren Betonkern und der äußeren Stahlkonstruktion ändert sich über die Höhe des Turms.



© Bock, Linner – nach Informationsmaterial Obayashi

Von 0 bis 125 Metern sind die beiden Strukturen fest miteinander verbunden und bilden einen festen Sockel. Dieser ist durch ein innovatives Fundament-System im Untergrund verankert, verzweigte wandähnliche Scheiben, die wie die Wurzeln eines Baumes in den Untergrund getrieben sind. Die Wand ist überall mit Metalldornen versehen, welche dem Fundament sichere Haftung verleihen, auch im Falle extremer Windkräfte die auf die 632 Meter hohe Struktur einwirken können. Von 125 bis 375 Metern sind der Betonkern und die Stahlstruktur durch Öldämpfer verbunden.

Wären alle Teile des Turms fest miteinander verbunden, würden sich die Vibrationen über die Höhe des Gebäudes vervielfältigen. Der Bereich oberhalb von 375 Metern kann sehr flexibel auf Windkräfte reagieren und Vibrationen aus dem Erdboden gegensteuern. Durch die angewandte Strategie der Entkopplung kann die Stärke der seismischen Aktivität, die auf das Gebäude einwirkt, um 60 % reduziert werden.

Bild 3: Der Tokyo Sky Tree ist ein mehrfach segmentiertes System, das es den individuellen Segmenten erlaubt, an verschiedenen Stellen des Gebäudes unterschiedlich auf die Vibrationen zu reagieren. Links: Mehrfach segmentierte Struktur. Rechts oben: Der innere Betonkern („Shimbashira“) und die äußere Stahlstruktur sind mit Öldämpfern verbunden, welche beiden Segmenten unterschiedliche Bewegungen erlauben. Die Öldämpfer nehmen die Energie dann auf. Rechts unten: Verzweigtes wandähnliches Fundament-System, das wie die Wurzeln eines Baumes in den Boden getrieben ist.

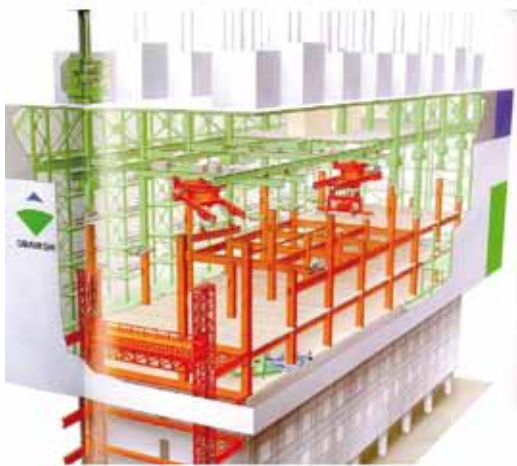
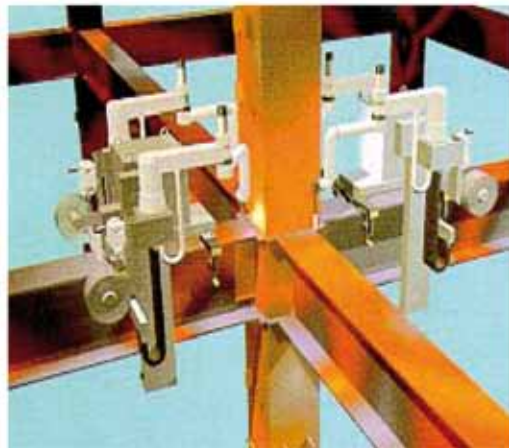


Bild 4: Automated Building Construction Systems (ABCS)

Robotik-gestützter Bau des Tokyo Sky Tree

Obayashi hat den Tokyo Sky Tree unter Verwendung von Sub-Systemen seines „Automated Building Construction Systems“ (ABCS) erbaut. Obayashi hat das ABCS seit 1980 kontinuierlich weiterentwickelt, um Montagevorgänge vor Ort in hohem Maße zu automatisieren. Das geschieht durch den Aufbau einer sich vertikal nach oben bewegenden Fabrik vor Ort mit automatisierter Logistik, automatisierter Positionierung von Stützen und Trägern, automatisierter Schweißtechnik und digitaler Echtzeit-Prozessüberwachung.

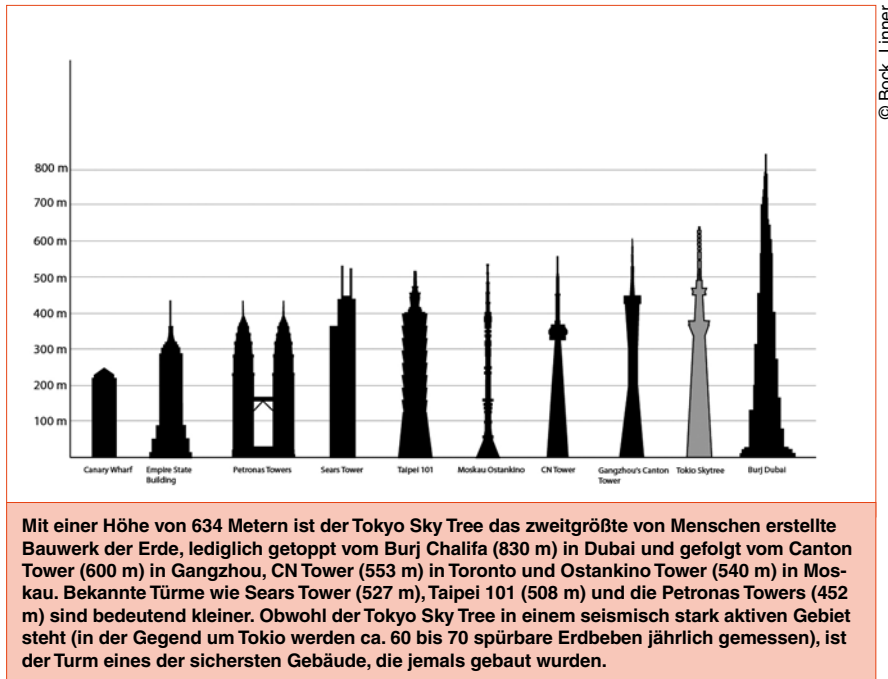
Eine vertikal bewegliche „Fabrik“ (SCF, Super Construction Factory) befindet sich am oberen Ende des Gebäudes und bewegt sich während des Bauprozesses Geschoss für Geschoss nach oben. Ein zentrales Element des SCF ist das automatisierte Baustellenlogis-

tiksystem (Parallel Delivery System, PDS), das sicherstellt, dass die Materialien vom Boden auf automatisiertem Wege an den Einbauort gelangen – einerseits in das richtige Geschoss und andererseits an die richtige Stelle. Nachdem das ABCS viele Prozesse automatisiert durchführt, ist hohe Präzision im Bau von Anfang an erforderlich. Aus diesem Grund kontrolliert Obayashi kontinuierlich die korrekte Position aller montierten Gebäudeteile und der Fabrik selbst mit einem hochpräzisen, lasergestützten Maßsystem.

Die Verwendung und Angleichung von Subsystemen des ABCS war im Falle des Tokyo Sky Tree hocheffizient, da der 634 Meter hohe Bau ein außergewöhnliches Projekt ist, das hoher Präzision und technischer Unterstützung bedarf. Folgende ABCS-Teilsysteme sind in abgewandelter Form für den Bau des Sky Tree verwendet worden.

Subsystem 1 – automatisierte Baustellenlogistik: Aufgrund der Herausforderung von Baustellen in den sehr dichten und überfüllten Gebieten in Tokio, die keine großen Beeinträchtigungen durch Baustellen erlauben, hat Obayashi – ähnlich wie andere große japanische Bauunternehmen – aus der Autoindustrie abgeleitete Methoden für die Anlieferung und Bereitstellung von Bauelementen „just in time and just in sequence“ entwickelt. Eine Reihe solcher Methoden wurde auch beim Bau des Tokyo Sky Tree verwendet. Innerhalb des Stahlkerns ist ein aus dem ABCS heraus entwickeltes Logistiksystem eingerichtet, um die Logistik effizienter zu gestalten. Beim Bau eines 634 Meter hohen Turms zählt sich diese Installation besonders aus.

Subsystem 2 – Schweißroboter: Aufgrund der Höhe von 634 Metern kann sogar die kleinste Abweichung die Struktur schwächen und die Anpassung



Mit einer Höhe von 634 Metern ist der Tokyo Sky Tree das zweitgrößte von Menschen erstellte Bauwerk der Erde, lediglich getoppt vom Burj Chalifa (830 m) in Dubai und gefolgt vom Canton Tower (600 m) in Gangzhou, CN Tower (553 m) in Toronto und Ostankino Tower (540 m) in Moskau. Bekannte Türme wie Sears Tower (527 m), Taipei 101 (508 m) und die Petronas Towers (452 m) sind bedeutend kleiner. Obwohl der Tokyo Sky Tree in einem seismisch stark aktiven Gebiet steht (in der Gegend um Tokio werden ca. 60 bis 70 spürbare Erdbeben jährlich gemessen), ist der Turm eines der sichersten Gebäude, die jemals gebaut wurden.

anderer großformatiger, vorgefertigter Segmente in darauf folgenden Bauphasen behindern. Wenn eine hohe Präzision abgestimmter angeschlossener Stahlsegmente garantiert werden muss, ist das automatisierte Schweißsystem von Obayashi ein bedeutender Gewinn. Das System schweißt Elemente präzise entlang der Verbindung von beiden gegenüberliegenden Seiten aus parallel zusammen. Das Schweißen von entgegengesetzten Seiten aus oder in einem eigens vorgegebenen Ablauf garantiert, dass die Verbindungen und Segmente sich während des Schweißvorgangs nicht verbiegen.

Subsystem 3 – Automatisiertes Setzen von Stützen: Der Bau des 634 Meter hohen Tokyo Sky Tree bedarf hoher Präzision, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen. Aus diesem Grund wurde das lasergestützte ABCS Subsystem für die automatisierte und hochpräzise Ausrichtung von Bauelementen eingesetzt. Für den Bau des Sky Tree wurde dieses System an die Gegebenheiten angepasst.

Ausblick

Da Japan regelmäßig von Erdbebenkatastrophen, Tsunamis, Taifunen, Bränden und Kriegszerstörung getroffen wird, hat das Land diese Desaster nicht nur bewältigt, sondern offensichtlich als Auslöser genommen, um neue Technologien und Strategien zu entwickeln. Regelmäßige Katastrophen sind sicher

ein Grund, warum Japans Bauindustrie heute so fortgeschritten ist.

Auch kann man nachweisen, dass Kriegszerstörung und Schäden durch Erdbeben regelmäßig hohen Bedarf an Gebäuden in kurzer Zeit auslösten und damit die Entwicklung industrialisierter und automatisierter Baumethoden beschleunigten. Auch die qualitativ hochwertigen Wohnhäuser, die japanische Firmen wie Sekisui House, Daiwa House und Sekisui Heim eher als eine Art Produkt (und nicht als klassisches Bauwerk) anbieten, sind Ergebnis einer enormen Nachfrage nach taifun- und erdbebensicheren Häusern. Firmen wie Obayashi, Kajima, Shimizum, Takenaka und auch kleinere Firmen, die mit der Bauausführung von Gebäuden zu tun haben, geben hohe Summen für die Forschung und Entwicklung neuer effizienter Technologien zur Erdbebensicherheit aus.

In Anbetracht dieser Tatsache kann vermutet werden, dass Japan die Katastrophe vom März 2011 (Erdbeben, Tsunami, Atomunfall) wieder einmal als Auslöser nimmt, die im Bauwesen zum Zuge kommenden Technologien und Prozesse sprunghaft voranzutreiben.



**Prof. Prof. h. c./SRSTU Dr.-Ing./
Univ. Tokio Thomas Bock**

Thomas Linner

Lehrstuhl für Baurealisierung und
Baurobotik Fakultät für Architektur
Technische Universität München
Arcisstrasse 21
80290 München
Tel.: (0)89-289 28650
Fax: (0)89-289 22102
E-Mail:
thomas.linner@bri.ar.tum.de
Internet: www.bri.ar.tum.de