



Thorsten Schütze

**Dezentrale Wassersysteme
im Wohnungsbau internationaler Großstädte**

am Beispiel der Städte Hamburg in Deutschland und Seoul in Süd-Korea

Thorsten Schütze

**Dezentrale Wassersysteme
im Wohnungsbau internationaler Großstädte
am Beispiel der Städte Hamburg in Deutschland und Seoul in Süd-Korea**

**Dezentrale Wassersysteme
im Wohnungsbau internationaler Großstädte
am Beispiel der Städte Hamburg in Deutschland und Seoul in Süd-Korea**

Von der Fakultät für Architektur und Landschaft
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Thorsten Schütze

geboren am 20.04.1967 in Flensburg

Erscheinungsjahr:

2005

Referentin:

Prof. Dr.-Ing. Margrit Kennedy

1. Koreferent:

Prof. Dr.-Ing. Ralf Otterpohl

2. Koreferent:

Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Willkomm

Tag der Promotion:

29.06.2005

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Thorsten Schütze:

Dezentrale Wassersysteme
im Wohnungsbau internationaler Großstädte
am Beispiel der Städte Hamburg in Deutschland und Seoul in Süd-Korea

Hamburg 2005

ISBN 3-8334-3671-9

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt.

© 2005 Thorsten Schütze

Herstellung und Verlag:

Books on Demand GmbH, Norderstedt

Abstract

The main disadvantages of conventional central systems for waste water treatment are that sewage streams with different characteristics and noxiousnesses are mixed and nutrients are eliminated. Leakages in the sewage system, overflows of mixed sewers and treatment lead to the contamination of ground- and surface waters with pollutants. They incur high costs and the lockup of capital for long periods of time - even decades - and they are not safe against catastrophes. Furthermore, adapting to changing demographic structures, user behavior, changing precipitation patterns as well as new technologies for sanitation involves high constructive and financial effort. The supply of drinking water also bears significant disadvantages because drinking water only is supplied and a complex system of mains is required. This can lead to high water losses due to leaking pipelines and has a negative impact on the quality of the supplied water, because of pipeline materials, leakages and long holding time.

As opposed to that alternative decentralized systems for sewage treatment and ecological sanitation (ecosan) provide manifold advantages and the possibilities of changes for the positive, e.g. the separation of waste water streams with different characteristics, which allow for an efficient treatment and high-quality utilization of nutrients. The protection of ground- and surface water is achieved by the avoidance of waste water, the decentralized treatment of different substances and waste water streams respectively. The low drinking water consumption is ensured by the utilization of service water and water saving sanitation systems. By saving majorly on canalization the construction of alternative water systems only incurs capital lockup for relatively short periods (<30 years). The systems are adaptable to changing demographic structures, changing precipitation patterns as well as new sustainable technologies for sanitation, and are unsusceptible to catastrophes and malfunctions. Furthermore they have the advantage of short pipeline lengths, minimized water losses and close water cycles.

In the framework of this dissertation, the potentials for the integration of alternative water systems in existing buildings for domestic use in the cities Hamburg/ Germany and Seoul/ Korea are investigated and a sophisticated evaluation according to social, economic and ecological criteria is conducted. The results are compared with the characteristics and effects of the existing central systems for drinking water supply and sewage treatment in cities; the differences as well as the potential is shown.

Alternative water systems are identified as a combination of single measures for the decentralized treatment of sewage and for the supply of water. Apart from using ecological sanitation systems they also include the processing of sewage to service water (rainwater utilization as well as sewage - and gray water recycling). The decentralized processing of drinking water is not investigated. The basic principles for the design and evaluation of alternative water systems, by the example of the redevelopment of two housing estates in Hamburg and Seoul, are a selection of single measures for alternative water systems, including their main characteristics as well as the description of the basic principles of efficient installation of sanitation and piping.

The average water consumption in private households can be reduced with minimal investment costs, minimal operating costs and without loss of comfort, by the installation of so called flow rate delimiters (water saving fittings), water saving household appliances and toilets, in Hamburg by 31% (from 117 l per resident and day to 81 l per resident and day) and in Seoul by 38% (from 208 l per resident and day to 129 l per resident and day).

These water saving households are the starting point for the investigations in the framework of this work. The proportion of the service water demand of water saving households in relation to the total water demand is estimated with 37% in Seoul and 26% in Hamburg. While the service water demand may vary, - depending on the different types of toilets used (e.g. vacuum- or urine-separation toilets) - the drinking water demand remains constant.

Alternative measures for the treatment of sewage can be assigned to two types: “decentralized rainwater conditioning” and “decentralized waste water conditioning”, which include the supply with service water. Subsequently, the main findings of both investigation areas as well as the characteristics of the single measures, with consideration of their interactions, are elucidated.

Decentralized rainwater conditioning

- **Measures for rainwater utilization may not be counted as a credit for the calculation of measures for the retention of rainwater and flood control.** The service water demand in Hamburg and Seoul is covered with 25 – 26% max. (~9% of the total water demand). Rainwater catchments from greened roofs reduce the degree of efficiency. The related construction work for this purpose does not limit the utilization of real estate and buildings in the investigated housing estates.
- **Measures for extensive greening of roofs contribute substantially to the retention of rainwater and may be counted as credit for the calculation of infiltration systems.** Together with intensive greening measures of roofs and buildings they contribute to an increase of the evaporation ratio thus approximating the micro climate to natural conditions. By irrigation with reclaimed waste water positive interactions can be achieved (e.g. decomposition of remaining nutrients, like Phosphorous). In Seoul, up to 70% of all roofs could be greened.
- **Measures for infiltration of rainwater and reclaimed waste water with shallow pits and infiltration ditches out of plastic, allow the complete retention of precipitation events** up to dimensioning precipitation events with a rainwater contribution frequency of 0,01/a. The related construction work for this purpose does not limit use of real estate and buildings in the investigated housing estates and are cheaper than rainwater utilization systems.

Decentralized waste water conditioning

- **Measures for the recycling of gray water (Sequency Batch Reactors or Membrane Activation Systems) from bathrooms and the utilization of service water can cover the service water demand in the investigated housing estates in Hamburg and Seoul by 100%** (~ 37 and 26% of the total water demand). In Hamburg, the measures are linked to additional required space (0,06m²/resident), while in Seoul no additional space is required.
- **Measures for the conditioning of waste water (brown- and gray water) with Sequency Batch Reactors or Membrane Activation Systems can be utilized for the realization of waste water free real estates in Hamburg and Seoul.** The purified and hygienically harmless water with bathing- or service water quality can be infiltrated, for artificial groundwater recharge, or be used for irrigation, e.g. that of intensive greenings of buildings (as above). The required constructions can be integrated - in Seoul in the area of existing septic tanks, and in Hamburg underneath a part of the courtyard - and do not limit the degree of use of real estate and buildings in the investigated housing estates. The small amount of sludge will be treated in a so called "Rottebehaelter" (see below)
- **Measures for the pre-treatment of brown- and gray water with "Rottebehaelter" can be integrated in the housing estates in Hamburg and Seoul outside, below ground without additionally occupying space inside the buildings.** With this measure, more than 1/3 of the contained nutrients can be separated and utilized, and the amount of sludge from the waste water treatment can be significantly reduced. The small amounts of "Rotte" (pre-composted material) are removed from the holding tanks regularly, 2 – 1 times a year, for further treatment.
- **Measures for the collection of yellow water can be integrated in the housing estates in Hamburg and Seoul underground, outside the buildings, without additionally requiring space inside the buildings and reduce the emissions of nutrients and micro pollutants in the environment.** In the case of a country-wide application, the required amount of Nitrogen in agriculture could be covered by 32% in the Republic of Korea and to 11% in Germany. The demand of phosphorous could be covered by 13% in Korea and by 11% in Germany. Hence the collected urine could be used to substitute chemical fertilizers and support organically farming. The collected yellow water is removed regularly from the housing estates with trucks, with a capacity of 15 tons. In Seoul once in a week and in Hamburg once in a month. In the case of an area wide application, 480 trucks would be required in Seoul and 80 in Hamburg each making three trips per day 5 times a week.
- **Measures for the fermentation of black water, biogas production and utilization in a combined heat and power generator require comparatively much space, in relation to the small volume of the treated waste water.** They can only be realized outside the buildings with additional construction effort. The expenditure for the transportation of the treated residues is also relatively high and is equivalent to 4.6-times that of the collected yellow water. The emissions of nutrients and micro pollutants into the environment are reduced to the greatest possible degree.

In order to determine the transferability of the findings in the testing areas and to compare the existing central systems for drinking water supply and waste water treatment in Hamburg and Seoul a system has been chosen, which can be used for both housing estates and is comprised of the following single measures:

- Rainwater retention- and infiltration (with reclaimed waste water) with mould – and plastic infiltration ditch systems
- Recycling of gray water from the bathrooms and service water utilization
- Waste water treatment (brown- and gray water)
- Pre-treatment of brown - and yellow water with “Rottebehälter”
- Collection of yellow water

The fermentation of black water, kitchen waste, biogas production and utilization in a combined heat and power generator has not been chosen for the system, due to the layout of the existing housing estates, the comparatively high space demand as well as the large investment costs and working expenses.

The installation of the required pipelines (service-, gray water from the bathroom and waste water) inside the buildings requires additional effort compared to the standard installation. For the installation of the vertical ducts of the described system, additional space is needed, while the horizontal pipelines can be installed without additional space. However, according to recent research results from Germany, the space expenditure can be reduced significantly, thus allowing for a significant reduction in diameter for the waste water pipelines. Therefore, in Seoul, all pipelines can be integrated inside the existing vertical ducts without any structural change. This is not possible in Hamburg, where for the installation of the vertical duct 30% additional space are required, compared to the standard installation.

The minimal investment and service costs for the alternative water system would, in Seoul, be twice as high as the present charges for waste and drinking water of standard households. This is calculated surmising payments covering a period of 20 years (without interest rates) and taking present charges for waste water and drinking water as a starting point, which however do not cover the actual real production, treatment and capital costs. If one were to take the actual real cost of production, treatment and capital as a starting point of ones calculations, the total costs would be lowered to a mere 2 thirds of the real cost of production, treatment and capital of the current standard systems. **In Hamburg, charges resulting from investment and service costs of the alternative water system (using the same financial determinates as a basis of calculation as above) would be the same as those of the current standard systems.** Due to the different natural basic conditions, the investment costs for measures of retention and infiltration of rainwater may vary significantly and may therefore affect the total cost for the system.

The primary energy expenditure of the alternative water system amounts, in Seoul, to 95% of that of the standard system, and in Hamburg, to 200%, and thus is twice as high. This significant difference is caused on the one hand, by the partially decentralized drinking water supply and waste water treatment in Seoul, and on the other hand, by the energy efficient central waste water treatment and drinking water supply in Hamburg. The primary-energy expenditure for the transportation of the yellow water (20 km) is minimal compared to that of decentralized waste water treatment.

The resident specific end-energy demand for an alternative water system amounts in Seoul 0.26 kWh per resident and day, and in Hamburg 0.18 kWh per resident and day. This value is equivalent to 10% of the average consumption of electricity in private households of South Korea (2.54 kWh per resident and day) and 5% of the average consumption in Germany (3.69 kWh per resident and day). **Compared with the total average end-energy demand of private households in Germany the additional demand for the alternative water system amounts to 0.2%.**

According to the findings of the investigations in two housing estates in Hamburg and Seoul, alternative water systems based on ecological sanitation are already realizable at present; with feasible constructive and technical effort as well as low additional cost compared to conventional construction costs. They can be implemented area-wide.

Due to very different climate conditions and the transferability of the single measures which have been described in the framework of this work, the basic conditions for a wide distribution and exportability can be fulfilled. Hence it may be expected, that alternative water systems and sewage free housing estates are realizable in many international cities. According to results from surveys in Seoul and experience in Germany and Europe, a high user acceptance of the system may be expected.

At present admittedly, there are many barriers to realizing alternative water systems. For Hamburg and Seoul the main barriers are both the structure of the fees incurred by implementing the alternative system and the institutional and legal framework. In Seoul there is the added problem of the present fees for drinking and waste water which do not cover the actual real costs. While decentralized rainwater management increasingly is recognized as a sustainable measure, acceptance of ecological sanitation is low, especially in urban areas, because there is great doubt regarding its profitability and feasibility. Scientifically supervised pilot projects and additional research regarding the optimization of institutional and legal frameworks as well as single measures and systems, can help to dispel the doubts and to mark the beginning of a paradigm shift in water management.

Kurzfassung

Konventionelle, zentrale Systeme zur Abwasserbehandlung haben erhebliche Nachteile, da sie auf der Vermischung von Stoffströmen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Schädlichkeiten sowie der Elimination von Nährstoffen basieren. Sie führen zur Kontamination von Grundwasser und Oberflächengewässern mit Schadstoffen durch Leitungsverluste, Mischwasserüberläufe und behandeltes Abwasser. Sie verursachen oft hohe Kosten und Kapitalbindung über sehr lange, Generationen übergreifende Zeiträume, beinhalten ein hohes Störpotenzial und sind anfällig gegenüber Katastrophen. Des Weiteren sind sie nur mit hohem baulichem und finanziellem Aufwand anpassbar, an sich verändernde Bevölkerungsstrukturen und Nutzerverhalten, wechselnde Niederschlagsmuster sowie neue, nachhaltige Sanitärtechnologien. Konventionelle, zentrale Systeme zur Trinkwasserversorgung haben ebenfalls erhebliche Nachteile, da sie ausschließlich auf der Versorgung mit Trinkwasser über komplexe Leitungsnetze basieren, was zum Teil zu hohen Leitungsverlusten und negativer Beeinflussung der eingespeisten Wasserqualität durch Rohrwerkstoffe, Leckagen und lange Standzeiten führt und daher häufig die Chlorung von Trinkwasser erfordert.

Alternative, dezentrale Systeme zur Abwasser- und Stoffstrombehandlung (ökologische Sanitärsysteme) eröffnen demgegenüber zahlreiche positive Veränderungspotenziale, wie z.B. die Trennung von Stoffströmen mit unterschiedlichen Eigenschaften, die eine effiziente Behandlung und qualitativ hochwertige Verwertung von Nährstoffen ermöglicht. Sie ermöglichen den Erhalt der Grundwasser- und Oberflächenwasserqualität durch Abwasservermeidung und dezentrale Aufbereitung verschiedener Stoff- bzw. Abwasserströme, sowie einen geringen Trinkwasserverbrauch durch die Verwendung von Betriebswasser und wassersparenden Sanitärsystemen. Durch den Verzicht auf Kanalisation ist der Bau mit einer Kapitalbindung über vergleichsweise kurze Zeiträume verbunden. Die Systeme sind mit geringem baulichem Aufwand anpassbar an sich verändernde Bevölkerungsstrukturen, wechselnde Niederschlagsverhalten sowie neue nachhaltige Sanitärtechnologien. Sie sind unanfällig gegenüber Katastrophen und weisen ein geringes Störpotenzial auf, ermöglichen die Versorgung mit verschiedenen Wasserqualitäten für unterschiedliche Nutzungen und verfügen über kurze Leitungswege, geringe Leitungsverluste und kleinräumige Wasserkreisläufe.

Im Rahmen dieser Dissertation werden die Integrationsmöglichkeiten von alternativen Wassersystemen im Wohnungsbaubestand der Städte Hamburg/ Deutschland und Seoul/ Korea untersucht und nach gesellschaftlichen, ökonomischen und ökologischen Kriterien differenziert bewertet. Die Ergebnisse werden verglichen mit den Eigenschaften und Auswirkungen der bestehenden zentralen Systeme zur Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung in beiden Städten. Die Unterschiede und positiven Veränderungspotenziale werden aufgezeigt.

Als alternative Wassersysteme wird die Kombination von Einzelmaßnahmen zur dezentralen Behandlung von Abwasser und zur Wasserversorgung bezeichnet. Diese beinhalten neben der Anwendung ökologischer Sanitärsysteme auch die Aufbereitung von Abwasser zu Betriebswasser (z.B. Regenwassernutzung sowie Schmutz- und Grauwasserrecycling). Die dezentrale Aufbereitung von Trinkwasser wird beschrieben aber die exemplarische Anwendung wird aufgrund der Komplexität des Themas nicht untersucht.

Eine Auswahl von Einzelmaßnahmen alternativer Wassersysteme mit ihren wichtigsten Eigenschaften und die Beschreibung der Grundlagen einer effizienten Sanitär- und Wasserinstallation, bilden die Grundlagen für die Planung und Beurteilung von alternativen Wassersystemen im Rahmen dieser Arbeit, am Beispiel zweier sanierungsbedürftiger Wohngebiete in Hamburg und Seoul.

Durch die Installation von Durchflussbegrenzern (Wasserspararmaturen), wassersparenden Haushaltsgeräten und Toiletten kann der durchschnittliche Wasserverbrauch in Privathaushalten bei minimalen Investitionskosten sowie ohne Komfortverlust und Betriebskosten gesenkt werden, in Hamburg um 31% (von 117 l/EW*d auf 81 l/EW*d) und in Seoul um 38% (von 208 l/EW*d auf 129 l/EW*d). Diese Wassersparhaushalte bilden die Ausgangsbasis für die Untersuchungen in dieser Arbeit. Der Betriebswasserbedarf ist für Wassersparhaushalte in Hamburg mit einem Anteil von 37% und für Seoul mit einem Anteil von 26% an der benötigten Gesamtmenge veranschlagt. Durch die Verwendung von unterschiedlichen Toiletten (Vakuum- oder Separationstoiletten) kann der Betriebswasserbedarf variieren, der Trinkwasserbedarf bleibt aber gleich.

Alternative Maßnahmen zur Behandlung von Abwasser können den Maßnahmentypen „dezentrale Regenwasserbewirtschaftung“ und „dezentrale Schmutzwasserbewirtschaftung“, die auch die Versorgung mit Betriebswasser beinhalten, zugeordnet werden. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse zu beiden Untersuchungsgebieten und Eigenschaften von Einzelmaßnahmen unter Berücksichtigung der Wechselbeziehungen untereinander, erläutert.

Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung

- **Maßnahmen zur Regenwassernutzung können nicht zum Rückhalt von Regenwasser und zur Flutkontrolle angerechnet werden.** Der Betriebswasserbedarf in Hamburg und Seoul kann maximal zu 25 – 26% gedeckt werden (~9% des Gesamtbedarfs). Regenwassersammlung von begrünten Dachflächen reduziert den Nutzungsgrad. Die hierfür erforderlichen Baumaßnahmen führen zu keinen Nutzungseinschränkungen von Grundstücken oder Gebäuden in den Untersuchungsgebieten.
- **Maßnahmen zur extensiven Dachbegrünung tragen wesentlich zum Rückhalt von Regenwasser bei, können bei der Dimensionierung von Versickerungsanlagen angerechnet werden und führen, ebenso wie intensive Dach- und Gebäudebegrünungsmaßnahmen zu einer Erhöhung der Verdunstungsrate und Annäherung des Mikroklimas an natürliche Verhältnisse.** Durch eine Bewässerung mit aufbereitetem Schmutzwasser können positive Wechselwirkungen erzielt werden (z.B. Abbau von Nährstoffen, wie Phosphor). In Seoul könnten bis zu 70% aller Dachflächen begrünt werden.
- **Versickerungsmaßnahmen mit Mulden- und Kunststoffrigolenelementen ermöglichen auch bei relativ wasserundurchlässigen Böden, ohne Anrechnung von Dachbegrünungen, in beiden Untersuchungsgebieten den vollständigen Rückhalt von Niederschlagsereignissen, die Bemessungsregenspenden mit einer Wiederkehrzeit von bis zu 100 Jahren entsprechen. Damit sind diese auch für den Rückhalt von extremen Niederschlagsereignissen geeignet, deren Häufigkeit in Zukunft im Rahmen des Klimawandels wahrscheinlich zunehmen wird.** Die hierfür erforderlichen Baumaßnahmen führen zu keinen Nutzungseinschränkungen von Grundstücken oder Gebäuden und sind mit geringeren Baukosten verbunden als Regenwassernutzungsanlagen.

Dezentrale Schmutzwasserbewirtschaftung

- **Maßnahmen zum Grauwasserrecycling (Sequency Batch Reactors oder Membranbelebungsanlagen) aus dem Bad und zur Betriebswassernutzung können den Betriebswasserbedarf in den Untersuchungsgebieten in den Untersuchungsgebieten in Hamburg und Seoul zu 100% decken** (~ 37 und 26% des Gesamtbedarfs). In Hamburg sind die Maßnahmen mit einem zusätzlichen Platzbedarf von 0,06m²/EW verbunden.
- **Maßnahmen zur Schmutzwasserbehandlung (Braun- und Grauwasser) (Sequency Batch Reactors oder Membranbelebungsanlagen) können zur Realisierung von abwasserlosen Grundstücken in den Untersuchungsgebieten in Hamburg und Seoul verwendet werden.** Das gereinigte, hygienisch unbedenkliche Wasser in Bade- oder Betriebswasserqualität kann zur Grundwasseranreicherung versickert und zur Bewässerung, z.B. von intensiven Gebäudebegrünungen verwendet werden (s.o.). Die hierfür erforderlichen Anlagen lassen sich ohne Nutzungseinschränkungen der Gebäude integrieren, in Seoul im Bereich von vorhandenen Klärtanks und in Hamburg unterirdisch im Innenhof. Die geringen anfallenden Schlammengen werden in Rottebehältern verwertet (s.u.).
- **Maßnahmen zur Vorbehandlung von Braun- und Grauwasser mit Rottebehältern lassen sich in den Untersuchungsgebieten in Hamburg und Seoul unterirdisch, außerhalb der Gebäude realisieren, ohne erhöhten Platzbedarf innerhalb der Gebäude.** Damit kann über 1/3 der enthaltenen Nährstoffe abgetrennt und verwertet sowie die bei der Schmutzwasserbehandlung anfallende Schlammmenge erheblich reduziert werden. Die geringen anfallenden Mengen von Rotte (vorkompostiertes Material) werden 1 – 2-mal pro Jahr mit Lastkraftwagen zur Weiterverwertung (z.B. Kompostierung) abgefahren.
- **Maßnahmen zur Gelbwassersammlung lassen sich in den Untersuchungsgebieten in Hamburg und Seoul unterirdisch außerhalb der Gebäude realisieren, ohne erhöhten Platzbedarf innerhalb der Gebäude und tragen zu einer signifikanten Senkung des Eintrags von Nährstoffen und Mikroverunreinigungen in die Umwelt bei.** Innerhalb der Wohnungen müssen hierfür Separationstoiletten und Urinale installiert werden. Bei einer flächendeckenden Umsetzung könnten in Südkorea ungefähr 32% (in Deutschland 11%) des landwirtschaftlichen Bedarfs an Stickstoff und 13% an Phosphor (in Deutschland 11%) gedeckt und Düngemittel substituiert werden. Das gesammelte Gelbwasser wird mit Tanklastwagen, mit einer Kapazität von 15m³, abgefahren, in Seoul ca. 1 x pro Woche und in Hamburg 1 x pro Monat. Bei flächendeckender Umsetzung würden in Seoul 480 und in Hamburg 80 Fahrzeuge benötigt werden, die an 5 Tagen in der Woche jeweils 3 Fahrten tätigen müssten.
- **Maßnahmen zur Vergärung von Schwarzwasser, Biogasproduktion und Verwertung in einem Blockheizkraftwerk benötigen, bezogen auf das Volumen der behandelten Abwassermenge, einen verhältnismäßig hohen Platzbedarf und lassen sich nur mit erhöhtem baulichem Aufwand außerhalb der Gebäude in den Untersuchungsgebieten in Hamburg und Seoul erstellen.** Der Transportaufwand ist relativ hoch und entspricht dem 4,6-fachen der Gelbwassermenge. Der Eintrag von Nährstoffen und Mikroverunreinigungen in die Umwelt wird größtmöglich verhindert.

Für die Ermittlung der Übertragbarkeit der Ergebnisse in den Untersuchungsgebieten und den Vergleich mit den bestehenden zentralen Systemen wurde für Hamburg und Seoul jeweils ein System ausgewählt, das folgende Einzelmaßnahmen beinhaltet und in beiden Untersuchungsgebieten integrierbar ist:

- Regenwasserrückhalt- und Versickerungsmaßnahmen (mit Schmutzwasser) mit Mulden- und Kunststoffrigolelementen
- Grauwasserrecycling aus dem Bad und Betriebswassernutzung
- Schmutzwasserbehandlung (Braun und Grauwasser)
- Vorbehandlung von Braun- und Grauwasser mit Rottebehältern
- Gelbwassersammlung

Die Vergärung von Schwarzwasser, Biogasproduktion und Verwertung in einem Blockheizkraftwerk wurde aufgrund der räumlichen Rahmenbedingungen sowie hohen Investitions- und Betriebskosten nicht ausgewählt.

Die Installation der notwendigen Rohrleitungen (Betriebs- Grauwasser aus dem Bad und Abwasser) innerhalb der Gebäude ist mit Mehraufwand gegenüber dem Standard-system verbunden. Während die Horizontalleitungen ohne erhöhten Platzbedarf installiert werden können, ist für die Installation der Vertikalleitungen des beschriebenen Systems grundsätzlich ein erhöhter Platzbedarf erforderlich. Unter der Berücksichtigung von aktuellen Forschungsergebnissen aus Deutschland, die eine signifikante Rohrweitenreduzierung der Abwasserleitungen zulassen, kann dieser Mehrbedarf erheblich reduziert werden. Daher sind alle erforderlichen Leitungen in die bestehenden Vertikalschächte der Apartments in Seoul integrierbar, während in Hamburg ein erhöhter Platzbedarf für die Schächte von ca. 30% gegenüber einer Standardinstallation erforderlich ist.

Die minimalen Investitions- und Betriebskosten für das alternative Wassersystem würden bei Zahlungen über eine Laufzeit von 20 Jahren (ohne Zinsen) in Seoul ca. doppelt so hoch sein wie die gegenwärtige, nicht kostendeckende Gebühr für Trink- und Abwasser in Standardhaushalten. Bei Berechnung einer kostendeckenden Gebühr würden die Investitions- und Betriebskosten nur 2/3 der kostendeckenden Gebühren betragen. **In Hamburg entsprechen die Betriebs- und Investitionskosten für dieses System, über die gleiche Laufzeit und ohne Zinsen, ungefähr den durchschnittlich anfallenden Gebühren von Standardhaushalten in Hamburg.** Aufgrund unterschiedlicher natürlicher Rahmenbedingungen, können die Kosten für Maßnahmen zum Rückhalt und der Versickerung von Regenwasser erheblich variieren und damit die Gesamtkosten für das System beeinflussen.

Der Primärenergiebedarf des alternativen Wassersystems beträgt im Verhältnis zum Energiebedarf für die zentrale Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung von Standardhaushalten in Seoul 95%, während er in Hamburg mit 200% doppelt so hoch ist. Dieser signifikante Unterschied ist einerseits auf die teildezentralisierte Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung in Seoul sowie andererseits auf die energieeffiziente zentrale Abwasserbehandlung und Trinkwasserversorgung in Hamburg zurückzuführen. Der Primärenergiebedarf für den Transport des Gelbwassers (20 km) ist im Verhältnis zum Bedarf für die Schmutzwasseraufbereitung minimal. Der einwohnerspezifische Endenergiebedarf für ein alternatives Wassersystem beträgt in Seoul 0,26 kWh/EW*d und in Hamburg 0,18 kWh/EW*d.

Dieser Wert entspricht 10% des durchschnittlichen Stromverbrauchs in Privathaushalten Südkoreas (2,54 kWh/EW*d) und 5% des Verbrauchs von Privathaushalten in Deutschland (3,69 kWh/EW*d). **Bezogen auf den durchschnittlichen Endenergiebedarf von privaten Haushalten in Deutschland (inkl. Pkw), entspricht der Mehrbedarf 0,2% des Gesamtbedarfes.**

Entsprechend der Ergebnisse aus den Untersuchungen zweier Wohngebiete in Hamburg und Seoul, sind alternative und auf Stoffstromtrennung basierende Wassersysteme im Wohnungsbau internationaler Großstädte bereits gegenwärtig mit vertretbarem konstruktivem und technischem Aufwand sowie verhältnismäßig geringen Mehrkosten gegenüber den herkömmlichen Sanierungs- und Baukosten realisierbar und relativ flächendeckend anwendbar.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen klimatischen Rahmenbedingungen und der Übertragbarkeit, der im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft beschriebenen Einzelmaßnahmen und Systeme, können die Grundvoraussetzungen für eine weite Verbreitung und Exportierbarkeit erfüllt werden und es kann davon ausgegangen werden, dass alternative Wassersysteme und Abwasser- abflusslose Wohngebiete in einer Vielzahl von internationalen Großstädten realisierbar sind. Nach Umfragen in Seoul und Erfahrungen aus Deutschland und Europa lässt das System eine hohe Nutzerakzeptanz erwarten.

Allerdings gibt es gegenwärtig zahlreiche Barrieren für die Umsetzung alternativer Wassersysteme. Neben den Gebührenstrukturen und den nicht kostendeckenden Gebühren für Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung in Seoul, sind diese wesentlich auf die institutionellen und rechtlichen Rahmenbedingungen in Seoul und Hamburg zurückzuführen. Während die dezentrale Bewirtschaftung von Regenwasser mittlerweile zunehmend als zukunftsfähige Maßnahme allgemein anerkannt ist, werden Umsetzbarkeit, Akzeptanz und Nutzen der ökologischen Sanitärtechnik allgemein stark bezweifelt, insbesondere in innerstädtischen Bereichen. Pilotprojekte unter wissenschaftlicher Betreuung und weitere Forschungen hinsichtlich der Optimierung von institutionellen und rechtlichen Rahmenbedingungen sowie Einzelmaßnahmen und Systemen, können in Zukunft helfen, diese Zweifel auszuräumen und einen Paradigmenwechsel in den Bereichen Wasserwirtschaft, Gebäudeplanung und städtische Infrastruktur einzuleiten.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin und Erstgutachterin Prof. Dr.-Ing. Margrit Kennedy, die mich entscheidend inspiriert hat, mich intensiv mit dem Thema Wasser auseinanderzusetzen. Des Weiteren den Gutachtern Prof. Dr.-Ing. Ralf Otterpohl und Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Willkomm für Anregungen, Diskussionen sowie konstruktive Kritik. Bedanken möchte ich mich außerdem bei Prof. D. I. Dr. techn. habil. Alfons Dworsky und dem Fachbereich Architektur der Universität Hannover sowie der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg und Prof. Dr. Wolfgang Dickhaut für die Unterstützung und gemeinsame Betreuung von Diplomarbeiten am Fachbereich Bauingenieurwesen.

Auch möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bei einer Vielzahl von Personen und Institutionen bedanken, die mich während der vergangenen vier Jahre bei den begleitenden Forschungen und Recherchen zu dieser Doktorarbeit unterstützt haben.

Diese sind in Deutschland: André Schwark; Andrea Aboldt, Maïke Schmelzer und Martin Oldenburg (Otterwasser GmbH); Angelika Kieck und Karin Dürr (STEG Hamburg); Birthe Einsiedler; Brigitte Reichmann (Senatsverwaltung Berlin); Christian Wilhelm (Geoterra); Christine Werner (GTZ); Dieter Ohnesorge (BUND); Dr. Gudrun Beneke; Dr.-Ing. Harald Hiesl (Fraunhofer ISI); Dr.-Ing. Hugo Feurich; Dr. Uwe Großmann; Franziska Meinzinger, Claudia Wendtland, Dr.-Ing. Deepak Gajurel, Dr.-Ing. Ulrich Braun (TU HH); Gisela Wernicke, Caren Reinecke und Ulf Rakelmann (HSE); Hans Werner (HWW); Harald Koch (SHK Hamburg); Harald Kraft; Herrn Behnke (Rödiger Vakuum- und Haustechnik); Holger König (Edition Aum); Holger Wallbaum; Indo Dhingra; Joachim Abig (Sanitärsystemtechnik); Kai Fabig und Klaus Dieter Sondergeld (Umweltbehörde Hamburg); Klaus W. König, Martin Bullermann, Dietmar Speerfeld und Erwin Nolde (FBR); Malte Sadetzky; Marco Schmidt und Kyung-Ho Kwon (TU Berlin, Institut für Landschaftsentwicklung); Nicole Drücker; Peter Thomas (HATI); Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. pol. K.-U. Rudolph GmbH; Ralf Behrens (HAW); Salvatore Costanzo; Siegbert Mahal; Simone Meuler (Huber); Thomas Hoffmann; Thomas Jeltsch (Pontos), Udo Scherer (Uni Hannover); Uwe Klaus (Aquaplaner) sowie Wolfgang Berger (Berger Biotechnik).

Auf internationaler Ebene bin ich folgenden Personen zu Dank verpflichtet: Dr. Edi Medlanski und Dr. Tove Larson (EAWAG Novaquatis); Dr. Vicente Santiago-Fandino (UNEP IETC); Hyunna Kim; Jang-Il Yang (KFEM); Jongtae Lee (Ssangyong); Joon-Kyoung Han; Kwong Fai Andrew Lo und Jessica Calfoforo (IRCSEA); Makoto Murase; Nobuhiro Suzuki; Prof. Dr. Deog-Seong Oh; Prof. Dr. Mooyoung Han (Seoul National University); Prof. Dr. Pil-Ryul Lee (Seoul Open National University); Prof. Dr. Tae-Goo Lee (Semyung University); Prof. Yeanok Oh (Konkuk University); Youndo Kang sowie Youngjin Kim und zahlreichen Experten in Süd-Korea aus den Bereichen Forschung, Wissenschaft, Politik und Wirtschaft, die sich für Interviews zur Verfügung gestellt haben.

Für das Lektorat bedanke ich mich besonders herzlich bei Birgit Groteloh, Gerrit Groteloh und Manfred Reimann.

Widmung

Ich widme diese Arbeit den Menschen in der Hoffnung, dass diese Wasser – Urquell des Lebens – in Zukunft nachhaltiger bewirtschaften, um die natürlichen Wasserressourcen für zukünftige Generationen erhalten und Konflikte um Trinkwasser vermeiden zu helfen.

Schlagworte:

Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserbehandlung, Kreislaufwirtschaft, ökologische Sanitärtechnik, Architektur, Stadtplanung

Keywords:

Sustainable water supply and waste water treatment, closed loop recycling management, ecological sanitary engineering, architecture, urban planning

Inhaltsverzeichnis

ABSTRACT	5
KURZFASSUNG.....	10
DANKSAGUNG	15
WIDMUNG.....	15
INHALTSVERZEICHNIS	17
EINFÜHRUNG - METHODE	23
1 HAMBURG – STADTENTWICKLUNG, WASSERVERSORGUNG UND ABWASSERBEHANDLUNG	31
1.1 EINLEITUNG	31
1.2 GEOGRAFISCHE LAGE.....	31
1.3 KLIMA	32
1.4 HISTORISCHE WASSERVERSORGUNG UND ABWASSERBEHANDLUNG.....	33
1.4.1 Wasserversorgung und Abwasserbehandlung im 19. Jahrhundert	35
1.4.2 Entwicklung der Abwasserbehandlung im 20. Jahrhundert	40
1.5 GEGENWÄRTIGE ABWASSERBEHANDLUNG IN HAMBURG.....	46
1.5.1 Kanalisation	47
1.5.2 Zusammensetzung des Abwassers und Schmutzfracht.....	52
1.5.3 Abwasserbehandlung in Klärwerken.....	53
1.5.4 Grenzwerte für behandeltes Abwasser.....	56
1.5.5 Schlammbehandlung	58
1.6 GEGENWÄRTIGE WASSERVERSORGUNG IN HAMBURG	61
1.6.1 Trinkwasserressourcen für Hamburg.....	61
1.6.1.1 Grundwasser	62
1.6.1.2 Grundwasserneubildung	71
1.6.2 Gebühren und Kosten.....	73
1.6.2.1 Kosten der Stadtentwässerung und zentralen Abwasserbehandlung.....	73
1.6.3 Gebühren für Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung	76
1.6.3.1 Trinkwassergebühr in Deutschland und Hamburg.....	76
1.6.3.2 Trinkwassergebühr im internationalen Vergleich	77
1.6.3.3 Abwassergebühr.....	78
1.6.3.4 Abwassergebühr im internationalen Vergleich	80
1.6.3.5 Übersicht aktuelle Trinkwasser und Abwasser Gebühren	80
1.7 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN.....	81
1.7.1 Gesetzgebung auf europäischer Ebene und Bundesebene.....	82
1.7.2 Gesetzgebung in Hamburg	84
1.8 UMWELTAUSWIRKUNGEN DER ABWASSERBEHANDLUNG IN HAMBURG	86
2 SEOUL – STADTENTWICKLUNG, WASSERVERSORGUNG UND ABWASSERBEHANDLUNG	93
2.1 EINLEITUNG.....	93
2.1.1 Geografische Lage	93
2.1.2 Klima.....	94
2.2 STADTENTWICKLUNG SEOUL.....	95
2.2.1 Geschichte.....	95
2.2.2 Vorindustrielle Entwicklung	96
2.2.3 Industrialisierung und moderne Stadtentwicklung	96
2.2.4 Wohnungsbau in Seoul.....	101
2.2.4.1 Sanierung des Wohngebäudebestands.....	104
2.3 ABWASSERBEHANDLUNG UND WASSERVERSORGUNG IN SEOUL.....	106
2.3.1 Traditioneller Umgang mit Menschlichen Fäkalien in Korea	106
2.3.2 Geschichte der zentralen Wasserversorgung und Abwasserbehandlung.....	112

2.3.2.1	Historische Wasserversorgung und Abwasserbehandlung.....	112
2.3.2.2	Wasserversorgung und Abwasserbehandlung im 20. Jahrhundert.....	113
2.3.3	<i>Gegenwärtige Abwasserbehandlung in Seoul</i>	116
2.3.3.1	Kanalisation.....	117
2.3.3.1.1	Sanierungsbedarf der Kanalisation.....	118
2.3.3.2	Abwasserbehandlung in Klärwerken.....	119
2.3.3.2.1	Grenzwerte für behandeltes Abwasser.....	121
2.3.3.2.2	Schlammbehandlung.....	122
2.3.3.2.3	Umgang mit Niederschlagswasser.....	123
2.3.3.3	Abwasserinstallation in Privathaushalten.....	124
2.3.4	<i>Gegenwärtige Wasserversorgung in Seoul</i>	126
2.3.4.1	Trinkwasserressourcen in Korea.....	126
2.3.4.2	Trinkwasserressourcen für Seoul.....	129
2.3.4.2.1	Oberflächenwasser.....	129
2.3.4.2.2	Grundwasser.....	130
2.3.4.3	Wasserqualität.....	132
2.3.4.3.1	Oberflächenwasser.....	132
2.3.4.3.2	Grundwasser.....	134
2.3.4.4	Zentrale Trinkwasserversorgung.....	136
2.3.4.4.1	Rohwassergewinnung.....	136
2.3.4.4.2	Trinkwasseraufbereitung.....	138
2.3.4.4.3	Zentrale Trinkwasserversorgung.....	138
2.3.4.4.4	Trinkwassernutzung in Privathaushalten Seouls.....	139
2.3.4.4.4.1	Vertrauen in die Wasserqualität.....	141
2.3.4.4.4.2	Wasserverbrauch und Kostenbewusstsein.....	141
2.3.4.4.4.3	Toiletten.....	142
2.3.4.4.4.4	Körperhygiene.....	143
2.3.4.4.4.5	Kochen und Trinken.....	143
2.3.4.4.4.6	Geschirrspülen.....	144
2.3.4.4.4.7	Wäschewaschen.....	144
2.3.4.4.4.8	Gebäudereinigung und Bewässerung.....	144
2.3.4.4.4.9	Zusammenfassung Verteilung Wasserverbrauch.....	145
2.3.4.4.5	Haustechnik, Trinkwasserinstallation in Privathaushalten.....	145
2.3.5	<i>Gebühren, Kosten und Stromverbrauch</i>	146
2.3.5.1	Trinkwasser- und Abwassergebühren in Privathaushalten.....	146
2.3.5.1.1	Kostenbilanz der Trinkwasserversorgung in Seoul.....	148
2.3.5.1.1.1	Kosten für die Trinkwasserversorgung.....	149
2.3.5.1.1.2	Einnahmen der Trinkwasserversorgung.....	150
2.3.5.1.2	Kostenbilanz der Abwasserbehandlung in Seoul.....	151
2.3.5.1.2.1	Kosten der Abwasserbehandlung.....	151
2.3.5.1.2.2	Einnahmen der Abwasserbehandlung.....	153
2.3.5.2	Zusammenfassung.....	153
2.3.5.2.1	Kosten.....	153
2.3.5.2.2	Stromverbrauch.....	154
2.3.6	<i>Institutionelle und Rechtliche Rahmenbedingungen</i>	155
2.3.6.1	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	155
2.3.6.2	Institutionelle Rahmenbedingungen.....	156
2.3.6.2.1	Betriebswassernutzung.....	157
2.3.6.2.1.1	Regenwasser.....	158
3	ALTERNATIVE WASSERSYSTEME - MAßNAHMENKATALOG	159
3.1	EINLEITUNG.....	159
3.2	DEZENTRALE REGENWASSERBEWIRTSCHAFTUNG.....	164
3.2.1	<i>Übersicht</i>	164
3.2.2	<i>Datenverarbeitung und Modellierung</i>	170
3.2.3	<i>Einzelmaßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung</i>	172
3.2.3.1	Gebäudebegrünung.....	173
3.2.3.1.1	Dachbegrünung.....	173
3.2.3.1.2	Fassadenbegrünung.....	185
3.2.3.2	Versickerungsmaßnahmen.....	188
3.2.3.2.1	Wasserdurchlässige Befestigung von Oberflächen.....	191
3.2.3.2.2	Flächenversickerung.....	194

3.2.3.2.3	Muldenversickerung	194
3.2.3.2.4	Rigolenversickerung	195
3.2.3.2.4.1	Mulden-Rigolenversickerung	196
3.2.3.2.4.2	Rohr-Rigolenversickerung	196
3.2.3.2.5	Schachtversickerung	197
3.2.3.2.6	Konsequenzen der Regenwasserversickerung für die Wasserinstallation	197
3.2.3.3	Regenwassernutzung	198
3.2.3.3.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	199
3.2.3.3.2	Regenwasserbehandlung	201
3.2.3.3.3	Regenwasserspeicher	202
3.2.3.3.4	Betriebswasserversorgung	203
3.2.3.3.4.1	Betriebswassernutzung in der Wasserinstallation	205
3.3	DEZENTRALE BEWIRTSCHAFTUNG VON SCHMUTZWASSER	206
3.3.1	Übersicht	206
3.3.2	Einzelmaßnahmen zur Bewirtschaftung von Schmutzwasser	207
3.3.2.1	Membrantechnologie:	207
3.3.2.1.1	Dezentrale Trinkwasseraufbereitung mit Membranen	211
3.3.2.2	Grauwasserbehandlung und Wiederverwendung	212
3.3.2.2.1	Tauchtropfkörper	215
3.3.2.2.2	Belebungsverfahren – geschlossene „Sequency Batch Reactors“	217
3.3.2.2.3	MBR – Membranbelebungsreaktor	219
3.3.2.2.4	Membranbelebungsverfahren in Korea	220
3.3.2.3	Braun- und Schwarzwasserbehandlung	222
3.3.2.3.1	Abtrennung der Feststoffe	223
3.3.2.3.2	Schmutzwasserbehandlung	223
3.3.2.3.2.1	Membranbelebung	223
3.3.2.3.2.2	SBR - Anlagen	226
3.3.2.3.3	Verwertung	226
3.3.2.3.3.1	Rotte und Kompostierung	226
3.3.2.3.3.2	Vergärung und Biogaserzeugung	228
3.3.2.3.3.3	Schwarzwasserkreislauf	231
3.3.2.3.3.4	Braunwasserkreislauf	234
3.3.2.3.4	Gelbwasserbehandlung - Urinseparation	235
3.4	PERSPEKTIVEN TRINK- UND BETRIEBSWASSERVERSORGUNG	243
3.5	PERSPEKTIVEN LÖSCHWASSER UND FEUERSCHUTZ	245
4	SANITÄR- UND WASSERINSTALLATION - MAßNAHMENKATALOG	247
4.1	EINLEITUNG	247
4.2	ÜBERSICHT KOMPONENTEN	247
4.2.1	Armaturen - Zapfstellen	248
4.2.2	Toiletten	251
4.2.2.1	Trockentoiletten	251
4.2.2.2	Toiletten mit Wasserspülung	255
4.2.2.2.1	Wasserspautoiletten	258
4.2.2.2.2	Übersicht Toiletten mit Wasserspülung	264
4.2.2.3	Urinale ohne Wasserspülung	265
4.3	ENTWÄSSERUNGSINSTALLATION	265
4.3.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	265
4.3.2	Schmutzwasseranlagen	266
4.3.3	Bemessung von Schmutzwasseranlagen mit Schwerkraftentwässerung	267
4.3.4	Materialgehalt	271
4.3.5	Rohrwerkstoffe Abwasser	271
4.3.5.1	Umweltauswirkungen verschiedener Rohrwerkstoffe	272
4.3.6	Installationsaufwand	273
4.3.7	Bemessung von Schmutzwasseranlagen mit Vakuumentwässerung	274
4.3.8	Bemessung von Anlagen für die Regenwasserentwässerung	275
4.4	WASSERVERSORGUNG	276
4.4.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	276
4.4.2	Rohrwerkstoffe Wasserversorgung	280
4.4.2.1	Umweltbilanzierung von Trinkwasserinstallationssystemen	284
4.4.3	Bemessung von Trink- und Betriebswasserleitungen	287

4.4.4	<i>Anordnung und Verlegung von Leitungen</i>	288
4.4.5	<i>Installationsaufwand</i>	294
4.5	ZUSAMMENFASSUNG ABWASSER- UND WASSERINSTALLATION	294
5	ALTERNATIVE WASSERSYSTEME IN HAMBURG	297
5.1	EINLEITUNG	297
5.2	WASSERVERBRAUCH UND SCHMUTZWASSERANFALL	299
5.3	SANITÄR- UND WASSERINSTALLATION FÜR ALTERNATIVE WASSERSYSTEME	302
5.4	EINZELMAßNAHMEN FÜR ALTERNATIVE WASSERSYSTEME IN HAMBURG	305
5.4.1	<i>Regenwasserbewirtschaftung</i>	305
5.4.1.1	Regenwasserversickerung	305
5.4.1.1.1	Modellbeschreibung	305
5.4.1.1.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen	307
5.4.1.1.3	Kosten und Gebühren	308
5.4.1.1.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	309
5.4.1.1.5	Institutionelle und rechtliche Aspekte	310
5.4.1.2	Dachbegrünung	311
5.4.1.3	Regenwassernutzung	312
5.4.1.3.1	Modellbeschreibung	312
5.4.1.3.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen	312
5.4.1.3.3	Kosten und Gebühren	313
5.4.1.3.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	314
5.4.1.3.5	Institutionelle und Rechtliche Aspekte	314
5.4.2	<i>Bewirtschaftung von Schmutzwasser</i>	315
5.4.2.1	Grauwasserrecycling und Betriebswassernutzung	315
5.4.2.1.1	Modellbeschreibung	315
5.4.2.1.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen	316
5.4.2.1.3	Kosten und Gebühren	317
5.4.2.1.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	318
5.4.2.1.5	Institutionelle und Rechtliche Aspekte	318
5.4.2.2	Gelbwassersammlung	319
5.4.2.2.1	Modellbeschreibung	319
5.4.2.2.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen	319
5.4.2.2.3	Kosten und Gebühren	321
5.4.2.2.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	323
5.4.2.2.5	Institutionelle und Rechtliche Aspekte	323
5.4.2.3	Wasserspatoilette (Vakuum) mit Vergärung und Biogaserzeugung	324
5.4.2.3.1	Modellbeschreibung	324
5.4.2.3.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen	324
5.4.2.3.3	Kosten und Gebühren	326
5.4.2.3.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	327
5.4.2.3.5	Institutionelle und Rechtliche Aspekte	328
5.5	AUSGEWÄHLTE MODELLE FÜR ALTERNATIVE WASSERSYSTEME IN HAMBURG	328
5.5.1	<i>Modellbeschreibung</i>	328
5.5.2	<i>Platzbedarf und bauliche Veränderungen</i>	329
5.5.3	<i>Kosten und Gebühren</i>	330
5.5.4	<i>Auswirkungen auf den Wasserhaushalt</i>	337
5.5.5	<i>Institutionelle und Rechtliche Aspekte</i>	338
5.6	ZUSAMMENFASSUNG	339
6	ALTERNATIVE WASSERSYSTEME IN SEOUL	345
6.1	EINLEITUNG	345
6.2	WASSERVERBRAUCH UND SCHMUTZWASSERANFALL	349
6.3	SANITÄR- UND WASSERINSTALLATION FÜR ALTERNATIVE WASSERSYSTEME	353
6.3.1	<i>Wasserinstallation</i>	356
6.3.2	<i>Abwasserinstallation</i>	359
6.3.2.1	Nennweitenberechnung Schmutzwasserinstallation	360
6.3.3	<i>Installationsaufwand für alternative Wassersysteme</i>	365
6.4	EINZELMAßNAHMEN FÜR ALTERNATIVE WASSERSYSTEME IN SEOUL	369
6.4.1	<i>Regenwasserbewirtschaftung</i>	369
6.4.1.1	Regenwasserrückhalt und Versickerung mit Dachbegrünung	370

6.4.1.1.1	Modellbeschreibung	371
6.4.1.1.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen.....	376
6.4.1.1.3	Kosten und Gebühren.....	377
6.4.1.1.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	377
6.4.1.1.5	Institutionelle und rechtliche Aspekte	378
6.4.1.2	Regenwassernutzung	378
6.4.1.2.1	Modellbeschreibung	378
6.4.1.2.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen.....	380
6.4.1.2.3	Kosten und Gebühren.....	381
6.4.1.2.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	382
6.4.1.2.5	Institutionelle und Rechtliche Aspekte.....	383
6.4.2	<i>Bewirtschaftung von Schmutzwasser</i>	384
6.4.2.1	Grauwasserrecycling und Betriebswassernutzung	384
6.4.2.1.1	Modellbeschreibung	384
6.4.2.1.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen.....	387
6.4.2.1.3	Kosten und Gebühren.....	388
6.4.2.1.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	390
6.4.2.1.5	Institutionelle und Rechtliche Aspekte.....	390
6.4.2.2	Gelbwassersammlung	391
6.4.2.2.1	Modellbeschreibung	391
6.4.2.2.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen.....	391
6.4.2.2.3	Kosten und Gebühren.....	392
6.4.2.2.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	393
6.4.2.2.5	Institutionelle und Rechtliche Aspekte.....	394
6.4.2.3	Wasserspatoilette (Vakuum) mit Vergärung und Biogaserzeugung	395
6.4.2.3.1	Modellbeschreibung	395
6.4.2.3.2	Platzbedarf und bauliche Veränderungen.....	396
6.4.2.3.3	Kosten und Gebühren.....	397
6.4.2.3.4	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	398
6.4.2.3.5	Institutionelle und Rechtliche Aspekte.....	398
6.5	AUSGEWÄHLTE MODELLE FÜR ALTERNATIVE WASSERSYSTEME IN SEOUL.....	399
6.5.1	<i>Modellbeschreibung</i>	399
6.5.2	<i>Platzbedarf und bauliche Veränderungen</i>	401
6.5.3	<i>Kosten und Gebühren</i>	404
6.5.4	<i>Auswirkungen auf den Wasserhaushalt</i>	412
6.5.5	<i>Institutionelle und Rechtliche Aspekte</i>	414
6.6	ZUSAMMENFASSUNG	417
7	POTENZIALE ALTERNATIVER WASSERSYSTEME	423
7.1	EINLEITUNG	423
7.2	POTENZIALE ALTERNATIVER WASSERSYSTEME IN HAMBURG UND SEOUL	423
7.3	FAZIT	433
8	FORSCHUNGSBEDARF UND ZUKUNFTSAUSSICHTEN	434
8.1	GRUNDSÄTZLICHES	434
8.2	FORSCHUNGSBEDARF FÜR EINZELMAßNAHMEN ALTERNATIVER WASSERSYSTEME	434
8.3	INSTITUTIONELLE ASPEKTE IN HAMBURG UND SEOUL	437
8.4	HAMBURG-SPEZIFISCHE ASPEKTE	438
8.5	SEOUL-SPEZIFISCHE ASPEKTE	439
9	ZUSAMMENFASSUNG	441
10	QUELLEN	443
10.1	LITERATURVERZEICHNIS	443
10.2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	461
11	GLOSSAR.....	479
	BERUFLICHER UND WISSENSCHAFTLICHER WERDEGANG DES AUTORS.....	494