Smart living w formule kontenerowej:

Potencjał budownictwa modułowego dla zrównoważonego mieszkalnictwa miejskiego

Jonas Jerger, Jannik Mack

Duale Hochschule Baden-Württemberg w Heidenheim, Wydział Ekonomii, kierunek: informatyka gospodarcza

Streszczenie

W gęsto zabudowanych obszarach miejskich rośnie presja na szybkie, ekonomiczne, a zarazem zrównoważone tworzenie dodatkowej przestrzeni mieszkaniowej. Chociaż modułowe budownictwo mieszkaniowe jest już szeroko omawiane w literaturze naukowej, nadal brakuje ukierunkowanej analizy kontenerowych modułów mieszkalnych, która jednocześnie uwzględniałaby ekologiczne, ekonomiczne i technologiczne kryteria smart living oraz odnosiła je do kontekstu miejskiego.

W niniejszej pracy termin „moduły kontenerowe" nie odnosi się do ogólnych konstrukcji modułowych, lecz do przenośnych, przemysłowo prefabrykowanych jednostek mieszkalnych o ramowej konstrukcji zbliżonej do kontenerowej, wyposażonych w infrastrukturę budowlaną i informatyczną umożliwiającą podłączenie do sieci. Analizie poddano potencjał i ograniczenia tej metody budowania w kontekście miejskim, ze szczególnym uwzględnieniem czasu realizacji, kosztów, wskaźników emisji CO_2 i zużycia energii oraz korzyści wynikających z eksploatacji opartej na monitoringu.

Pod względem metodologicznym badanie opiera się na analizie literatury i wskaźników, prowadzonej w trzech wymiarach: ekologicznym, ekonomicznym i technologicznym. Wyniki analizy wskazują, że moduły kontenerowe wykazują istotny potencjał przede wszystkim dzięki wysokiemu stopniowi prefabrykacji, krótkim czasom montażu, elastycznym możliwościom zastosowania oraz fabrycznej integracji systemów cyfrowych. Potencjał ten ujawnia się szczególnie w projektach zagęszczania zabudowy oraz w przypadku tymczasowych form mieszkaniowych.

Jednocześnie należy podkreślić, że omawiana metoda budowania nie jest z zasady lepsza od rozwiązań konwencjonalnych. Potencjał ekologiczny i ekonomiczny zależy w znacznym stopniu od takich czynników, jak standaryzacja, dobór materiałów, jakość energetyczna, możliwość ponownego wykorzystania oraz niezawodna integracja systemów monitorowania i sterowania.

Moduły kontenerowe nie stanowią zatem uniwersalnego rozwiązania problemu niedoboru mieszkań w miastach. W odpowiednich warunkach mogą jednak znacząco przyczynić się do tworzenia przestrzeni mieszkaniowej bardziej elastycznej, efektywnej i zrównoważonej.

Słowa kluczowe: smart living; moduły kontenerowe; modułowe budownictwo mieszkaniowe; zrównoważona przestrzeń mieszkaniowa w mieście; zagęszczanie zabudowy; użytkowanie tymczasowe

1. Wprowadzenie i cele

Celem niniejszej pracy jest oparta na literaturze i wskaźnikach analiza potencjału ekologicznego, ekonomicznego i technologicznego oraz ograniczeń modułowych form mieszkaniowych opartych na kontenerach w kontekście zagęszczonych przestrzeni miejskich. W centrum uwagi znajdują się przenośne, przemysłowo prefabrykowane moduły mieszkalne o ramowej konstrukcji zbliżonej do kontenerowej, które mogą być wykorzystywane w miejskim budownictwie mieszkaniowym.

Badanie obejmuje trzy płaszczyzny analizy. Z perspektywy ekologicznej na pierwszy plan wysuwają się wskaźniki emisji CO_2 i zużycia energii, a także kwestie ponownego wykorzystania materiałów oraz efektywności zasobowej. Z perspektywy ekonomicznej uwzględnia się czas budowy, koszty realizacji oraz koszty eksploatacji. Z perspektywy technologicznej analizuje się natomiast, w jaki sposób systemy monitorowania, czujniki i rozwiązania sterujące mogą przyczynić się do bardziej efektywnej i przejrzystej eksploatacji budynków.

Na tej podstawie rozważa się, w jakich warunkach zastosowania w środowisku miejskim moduły kontenerowe wydają się szczególnie przydatne oraz jakie możliwości i ograniczenia ujawniają się w porównaniu z konwencjonalnymi, trwale związanymi z lokalizacją metodami budowlanymi. Na pierwszy plan nie wysuwa się empiryczne wykazanie ich ogólnej przewagi, lecz uporządkowana ocena potencjału, ograniczeń i warunków zastosowania.

2. Materiały i metody

2.1 Wymagania dotyczące mieszkań przyszłości

Aby w niniejszej pracy nie tylko opisać koncepcję smart living, lecz także uporządkować ją na potrzeby dalszej analizy, przełożono ją na konkretne wskaźniki. Wychodząc od takich zagadnień, jak presja czasowa w budownictwie miejskim, wymogi zrównoważonego rozwoju oraz cyfrowo wspomagane zarządzanie budynkami, kluczowe wymagania przyporządkowano do trzech wymiarów i ujęto jako operacyjne kryteria oceny w ramach analitycznych.

Tabela 1: Kryteria „Smart Living”

Wymiary	Wymagania dotyczące inteligentnego życia w kontekście miejskim	Wymierny wskaźnik	Jednostka / skala
Ekologiczne	Mieszkania oszczędzające zasoby i przyjazne dla klimatu w całym cyklu życia	Wskaźnik emisji CO_2 (w uproszczeniu: budowa/materiały + eksploatacja)	kg CO_2e/m^2 (lub kg CO_2e/m^2a dla eksploatacji)
Ekologiczne	Energetycznie efektywna eksploatacja	Zapotrzebowanie na energię końcową lub zużycie energii końcowej podczas eksploatacji	kWh/m^2a
Ekonomiczny	Szybka realizacja pomimo ograniczeń związanych z zabudową miejską	Czas budowy / czas realizacji	Tygodnie/miesiące
Ekonomiczny	Opłacalność (inwestycja i eksploatacja)	Koszty budowy + koszty eksploatacji (energia/konserwacja)	€/m² i €/m²a
Pod względem technologicznym	Przejrzystość i możliwość sterowania dzięki monitorowaniu (kluczowy element koncepcji „Smart Living”)	Zakres monitorowania: mierzalne zużycia/parametry (energia elektryczna/ciepło/woda, w razie potrzeby temperatura/jakość powietrza)	Odsetek (%) / Lista kontrolna
Pod względem technologicznym	Wzrost wydajności dzięki inteligentnemu sterowaniu	Potencjał oszczędności dzięki regulacji/automatyzacji (w porównaniu z rozwiązaniem „bez funkcji Smart”)	% lub kWh/m^2a

Wskaźniki zdefiniowane w tabeli 1 stanowią ramę dla dalszej, opartej na literaturze analizy modułów mieszkalnych opartych na kontenerach w kontekście miejskim. Uwzględniono kryteria ekologiczne, takie jak wskaźniki emisji CO_2 i zużycia energii, kryteria ekonomiczne, takie jak czas budowy oraz koszty realizacji i eksploatacji, a także kryteria technologiczne, takie jak zakres monitoringu i potencjalny wzrost efektywności dzięki systemom sterowania. Wskaźniki te nie są podstawą pełnych, empirycznych pomiarów porównawczych, lecz pełnią funkcję ustrukturyzowanych kryteriów oceny, umożliwiających przejrzystą dyskusję o potencjale, ograniczeniach i warunkach zastosowania modułów kontenerowych. W miarę możliwości odnoszono je do konwencjonalnych, stacjonarnych metod budowlanych.

2.2 Moduł kontenerowy

W niniejszej pracy termin „moduł kontenerowy” oznacza przenośną, przemysłowo prefabrykowaną jednostkę przestrzenną, którą na placu budowy można łączyć i układać w większe struktury

budynkowe za pomocą zdefiniowanych połączeń. Nie musi to być kontener transportowy ISO poddany recyklingowi; często są to moduły mieszkalne o konstrukcji ramowej przypominającej kontenerową, zaprojektowane z uwzględnieniem wymagań statycznych, izolacji cieplnej i akustycznej oraz instalacji technicznych. Jednostka badawcza jest zatem jasno zdefiniowana: jest nią standaryzowany moduł mieszkalny wyposażony w infrastrukturę budowlaną i informatyczną umożliwiającą podłączenie do sieci.

Moduły są prefabrykowane w kontrolowanych warunkach. Na placu budowy wykonuje się przede wszystkim fundamenty i konstrukcję nośną, a następnie ustawia i łączy moduły, podłącza media oraz przeprowadza uruchomienie.



Rysunek 1: Produkcja modułu kontenerowego (por. BigBox Berlin, 2018)

Dzięki równoległemu prowadzeniu produkcji i przygotowań na placu budowy możliwe jest skrócenie czasu realizacji. Prefabrykacja pozwala ponadto ustabilizować jakość wykonania oraz zmniejszyć uciążliwość placu budowy w obszarach miejskich. W przypadku zastosowań tymczasowych istotne jest również to, że moduły – w zależności od systemu – można rozmontować, przenieść i ponownie wykorzystać.

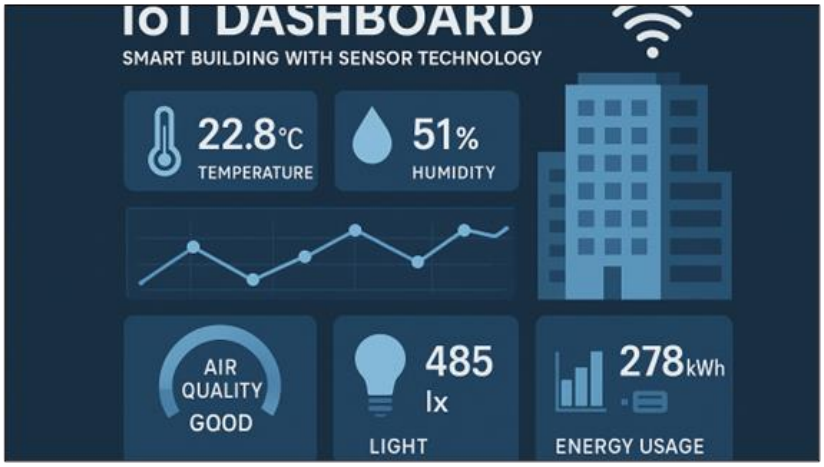


Rysunek 2: Mieszkania w kontenerach ustawionych jeden na drugim (por. Algeco, 2025)

Wyzwania wynikają między innymi z wymogów prawa budowlanego, w tym ochrony przeciwpożarowej, izolacji akustycznej i efektywności energetycznej, ograniczeń geometrycznych związanych z wymiarami modułów oraz newralgicznych punktów styku, takich jak szczelność i

szczegóły połączeń. Korzyści ekonomiczne często zależą od standaryzacji i skali produkcji; rozwiązania silnie zindywidualizowane ograniczają efekty skali.

Możliwość integracji technologii inteligentnych: Rozwiązania z zakresu smart living można z powodzeniem integrować już na etapie produkcji. Z punktu widzenia dalszej analizy szczególne znaczenie mają wówczas zakres monitorowania oraz wzrost efektywności wynikający z zastosowania systemów sterowania.



Rysunek 3: Przykładowy pulpit nawigacyjny IoT (por. Licdn, 2026)

3. Analiza czynników mierzalnych

3.1 Czynniki ekologiczne

W niniejszej pracy przez czynniki ekologiczne rozumie się mierzalne oddziaływania na środowisko, powstające w całym cyklu życia budynku. W centrum uwagi znajdują się w szczególności emisje CO_2, zużycie energii podczas eksploatacji, zużycie materiałów oraz możliwość cyrkularnego wykorzystania zastosowanych systemów (por. Baltrocchi i in., 2026, s. 2; Kamali & Hewage, 2016, s. 1176). Wymiar ekologiczny został tym samym świadomie oddzielony od aspektów ekonomicznych i organizacyjnych, takich jak koszty budowy czy czas realizacji. Przedmiotem oceny nie jest opłacalność ekonomiczna danego sposobu budowania, lecz jego wpływ na środowisko w fazie produkcji, użytkowania i ewentualnego demontażu.

Głównym wskaźnikiem jest uproszczony wskaźnik emisji CO_2 wyrażony w kg CO_2e na m^2. Składa się on z dwóch zasadniczych elementów: emisji związanych z produkcją materiałów i procesami budowlanymi oraz emisji wynikających z eksploatacji budynku w określonym okresie użytkowania. Oba elementy są istotne dla oceny ekologicznej, ponieważ bilansu klimatycznego budynku nie można wyprowadzać wyłącznie z fazy produkcji ani wyłącznie z fazy użytkowania, lecz należy go rozpatrywać jako rezultat oddziaływania obu faz cyklu życia (por. O'Hegarty i in., 2025). Aby porównanie było wiarygodne, konieczne jest przyjęcie identycznych funkcjonalnych wielkości odniesienia, porównywalnych granic systemu oraz spójnego okresu użytkowania.

W przypadku modułów mieszkalnych opartych na kontenerach szczególne znaczenie ma wysoki stopień prefabrykacji. Produkcja przemysłowa może ograniczać środowiskowe skutki procesu budowlanego, między innymi dzięki mniejszym stratom materiałowym, redukcji braków oraz bardziej jednolitej jakości wykonania w kontrolowanych warunkach produkcyjnych (por. Quale i in., 2012, s. 244). Pozytywna ocena ekologiczna nie jest jednak automatyczna. Moduły mieszkalne

przypominające kontenery często opierają się na konstrukcjach stalowych lub innych konstrukcjach ramowych, których wytworzenie może wiązać się z wysokimi emisjami (O'Hegarty i in., 2025). Ponadto bilans CO_2 zależy w znacznym stopniu od konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego, zwłaszcza od doboru materiałów, standardu izolacji, wykończenia wnętrz oraz zakresu wyposażenia technicznego. Decydujące znaczenie ma zatem nie sama forma konstrukcyjna, lecz konkretna konfiguracja modułu oraz to, czy rzeczywiście zostanie osiągnięte wielokrotne wykorzystanie lub ponowne użycie.

Drugim kluczowym wskaźnikiem, obok emisji CO_2, jest efektywność energetyczna podczas eksploatacji. Mierzy się ją na podstawie końcowego zapotrzebowania na energię lub zużycia energii w kWh/m²a. Aspekt ten ma szczególne znaczenie, ponieważ korzyści ekologiczne uzyskane w fazie produkcji mogą zostać ograniczone, a nawet zniwelowane, przez nieefektywną eksploatację budynku w okresie jego użytkowania. Jakość energetyczna modułów kontenerowych zależy w znacznym stopniu od przegród zewnętrznych budynku, zwłaszcza od standardu izolacji, szczelności powietrznej i ograniczenia mostków termicznych. Istotne są także szczegóły połączeń na styku modułów oraz zastosowane wyposażenie techniczne budynku. Przejścia między poszczególnymi modułami należą do obszarów szczególnie wrażliwych, ponieważ to właśnie w tych miejscach należy trwale zapewnić szczelność i izolacyjność termiczną. Jednocześnie prefabrykacja przemysłowa może przynosić korzyści, gdyż prace uszczelniające i instalacyjne w kontrolowanych warunkach często można wykonać precyzyjniej i w sposób bardziej powtarzalny niż na śródmiejskim placu budowy (por. Kamali & Hewage, 2016, s. 1174; Quale i in., 2012, s. 244).

Kolejnym czynnikiem wpływającym na środowisko jest zużycie materiałów oraz związana z nim problematyka zasobów i odpadów. Prefabrykacja może ograniczać straty materiałowe, ponieważ cięcie, magazynowanie i montaż odbywają się w zaplanowanym środowisku produkcyjnym. Pozwala to potencjalnie zmniejszyć liczbę prac poprawkowych, błędnych zamówień oraz ilość typowych odpadów budowlanych (por. Quale i in., 2012, s. 247). W kontekście miejskim oddziaływanie na środowisko może zostać dodatkowo ograniczone, jeśli dzięki skróceniu fazy montażu zmniejszą się ruch dostawczy, emisje pyłu i hałasu oraz nakłady logistyczne. Gdy nie jest dostępna pełna analiza cyklu życia, aspekty materiałowe można uzupełniająco oceniać za pomocą takich wskaźników, jak ilość odpadów, poziom recyklingu czy ustrukturyzowana ocena możliwości segregacji i ponownego wykorzystania materiałów (por. Kamali & Hewage, 2016, s. 1174).

Cechą charakterystyczną modułowych rozwiązań kontenerowych jest ponadto ich potencjalna cyrkularność i możliwość ponownego wykorzystania. Jeśli moduły zostaną zaprojektowane tak, aby można je było zdemontować, przetransportować i ponownie zastosować, emisje związane z ich produkcją można rozłożyć na kilka cykli użytkowania (por. Baltrocchi i in., 2026, s. 13). W rezultacie wskaźnik emisji CO_2 przypadający na rok użytkowania może ulec poprawie. Efekt ten występuje jednak tylko wtedy, gdy faktyczne ponowne wykorzystanie jest możliwe technicznie, prawnie i organizacyjnie. Warunkami koniecznymi są między innymi standaryzowane wymiary, rozłączalne połączenia, trwałe elementy konstrukcyjne oraz przejrzysta dokumentacja zastosowanych materiałów (por. Baltrocchi i in., 2026, s. 13–14).

Podsumowując, moduły kontenerowe nie są z natury bardziej ekologiczne od rozwiązań konwencjonalnych, jednak w określonych warunkach wykazują istotny potencjał. Potencjał ten ujawnia się zwłaszcza wtedy, gdy prefabrykacja zostaje połączona z odpowiednim doborem materiałów, wysoką jakością energetyczną oraz realistycznie możliwym do wdrożenia obiegiem materiałowym. Rzetelna ocena ekologiczna wymaga zawsze spójnego porównania obiektów pod

względem okresu użytkowania, wymagań funkcjonalnych i granic systemu. Rzeczywiste korzyści środowiskowe wynikające z zastosowania modułów kontenerowych zależą zatem w dużym stopniu od konkretnego wykonania, typu modułu oraz rzeczywistego sposobu wykorzystania w całym cyklu życia (por. Baltrocchi i in., 2026, s. 13–14).

3.2 Czynniki ekonomiczne

W niniejszej pracy czynniki ekonomiczne rozumiane są jako wielkości determinujące opłacalność i wykonalność modułowych konstrukcji kontenerowych w miejskim kontekście mieszkaniowym. W centrum uwagi znajdują się czas realizacji, koszty inwestycyjne oraz koszty eksploatacji i konserwacji w całym cyklu życia budynku (por. Bertram i in., 2019, s. 5; Guaygua i in., 2024, s. 2; Kamali i in., 2022). Perspektywa ekonomiczna została tym samym świadomie oddzielona od ujęcia ekologicznego: na pierwszy plan wysuwa się tu nie ocena środowiskowa, lecz pytanie, w jakich warunkach moduły kontenerowe można realizować i użytkować w sposób organizacyjnie efektywny oraz ekonomicznie uzasadniony w porównaniu z konwencjonalnymi, stacjonarnymi metodami budowlanymi. Jako kluczowe wskaźniki przyjmuje się czas budowy w tygodniach lub miesiącach, koszty inwestycyjne w €/m² oraz koszty eksploatacyjne w €/m²a. Rzetelna ocena ekonomiczna wymaga przy tym oddzielnego uwzględnienia kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz ich wzajemnych zależności w cyklu życia (por. Kamali i in., 2022).

Istotnym aspektem ekonomicznym systemów modułowych jest możliwość skrócenia czasu budowy dzięki prefabrykacji. W przypadku konwencjonalnych metod budowlanych wiele etapów prac przebiega sekwencyjnie na placu budowy, przez co są one silnie uzależnione od warunków pogodowych, dostępności personelu oraz logistyki miejskiej. W koncepcjach modułowych procesy produkcyjne w zakładzie i prace przygotowawcze na placu budowy mogą natomiast przebiegać równolegle (por. Bertram i in., 2019, s. 11). Podczas gdy na miejscu wykonywane są fundamenty, infrastruktura techniczna i ewentualnie konstrukcje nośne, moduły mogą być w tym samym czasie produkowane przemysłowo. Faza montażu sprowadza się następnie zasadniczo do ustawienia, połączenia i podłączenia modułów oraz uruchomienia instalacji technicznych. Takie skrócenie czasu realizacji wpływa nie tylko na samą długość budowy, lecz także na koszty pośrednie, takie jak koszty ogólne placu budowy, wynajem sprzętu i rusztowań, środki bezpieczeństwa czy ryzyko ekonomiczne związane z opóźnieniami (por. Bertram i in., 2019, s. 14). Badania porównawcze wskazują, że budownictwo modułowe wykazuje przewagi zwłaszcza w zakresie terminowości i organizacji przebiegu prac, natomiast korzyści kosztowe względem metod konwencjonalnych nie zawsze są równie wyraźne (por. Wang i in., 2025). W gęsto zabudowanych obszarach miejskich skrócenie fazy budowy może jednak mieć znaczenie ekonomiczne, ponieważ utrudnienia dla otoczenia i infrastruktury pozostają ograniczone w czasie.

Koszty inwestycyjne stanowią kolejny kluczowy wskaźnik i są zazwyczaj odnoszone do powierzchni mieszkalnej. W przypadku modułów kontenerowych obejmują one kilka elementów: fabryczną produkcję konstrukcji modułowej, wykończenie wnętrz i instalacje techniczne, usługi transportowe i dźwigowe, prace montażowe na placu budowy, a także świadczenia związane z lokalizacją, takie jak wykonanie fundamentów, uzbrojenie terenu, prace przyłączeniowe oraz ewentualne dodatkowe nakłady związane z uzyskaniem pozwoleń lub dostosowaniem obiektu. Potencjalne korzyści kosztowe mogą wynikać ze standaryzacji, produkcji seryjnej i powtarzalnych procesów produkcyjnych, ponieważ sprzyjają one stabilizacji kosztów jednostkowych i zwiększają pewność kalkulacji (por. Bertram i in., 2019, s. 23). Efekty te są jednak silnie uzależnione od struktury

projektu. Niewielka liczba modułów, wysoki stopień indywidualizacji lub złożone wymagania specjalne mogą znacząco ograniczyć efekty skali (por. Qiang i in., 2023). Badania dotyczące czynników kosztotwórczych w budownictwie modułowym pokazują ponadto, że wzrost kosztów mogą powodować zwłaszcza wczesne decyzje projektowe, problemy na styku rozwiązań technicznych, wymagania logistyczne oraz brak standaryzacji (por. Lee & Kim, 2017). Istotne są również uwarunkowania właściwe dla danego projektu, takie jak położenie działki, wymagania dotyczące ochrony przeciwpożarowej i izolacji akustycznej, geometria architektoniczna czy integracja z istniejącą infrastrukturą, które mają znaczący wpływ na koszty połączeń i dostosowań.

Oprócz kosztów inwestycyjnych należy uwzględnić także koszty eksploatacji i koszty cyklu życia, ponieważ ekonomiczna ocena budynku mieszkalnego nie kończy się w momencie jego ukończenia. Do kosztów eksploatacyjnych należą w szczególności koszty energii i mediów, koszty konserwacji wyposażenia technicznego budynku oraz wydatki na utrzymanie i naprawy (por. Guaygua i in., 2024, s. 14). Podejście oparte na cyklu życia jest szczególnie zasadne w przypadku modułowych form mieszkaniowych, ponieważ korzyści ekonomiczne mogą wynikać nie tylko z samego wzniesienia budynku, lecz także ze standaryzowanych procesów konserwacji, możliwych do zaplanowania przeglądów oraz strategii ponownego wykorzystania (por. Kamali i in., 2022). Wysoki stopień prefabrykacji umożliwia często standaryzację i systematyczną dokumentację komponentów technicznych, co może uprościć procesy konserwacyjne i ułatwić ich planowanie. Jednocześnie zaawansowana integracja technologii, na przykład poprzez systemy smart living, może generować dodatkowe koszty (por. Qiang i in., 2023). Obejmują one wydatki na czujniki, technikę sterowania, oprogramowanie, regularne aktualizacje oraz środki bezpieczeństwa IT. Z ekonomicznego punktu widzenia istotne jest zatem, czy wartość dodana generowana przez te systemy może w dłuższej perspektywie zrekompensować dodatkowe koszty, na przykład dzięki ograniczeniu przestojów, optymalizacji danych dotyczących zużycia lub bardziej efektywnemu planowaniu konserwacji. Ocena ta ma charakter analizy kosztów i korzyści, a nie oceny ekologicznej.

Dodatkowym, specyficznym aspektem ekonomicznym modułów kontenerowych jest możliwość ich przenoszenia. Jeśli po zakończeniu danej fazy użytkowania moduły można zdemontować i ponownie wykorzystać w innym miejscu, perspektywa ekonomiczna przesuwa się z projektu jednorazowego ku koncepcji wielokrotnego wykorzystania. W takim przypadku koszty inwestycyjne można rozłożyć na kilka faz eksploatacji, co może przynieść korzyści ekonomiczne, zwłaszcza przy tymczasowych potrzebach mieszkaniowych (por. Guaygua i in., 2024). Warunkiem jest jednak to, aby demontaż, transport, dostosowanie do nowych lokalizacji oraz ponowne procedury uzyskiwania pozwoleń pozostawały w ekonomicznie uzasadnionych granicach. W przeciwnym razie potencjalna korzyść ulega znacznemu osłabieniu. Przenośność nie jest zatem automatyczną gwarancją opłacalności, lecz potencjałem zależnym od kontekstu, którego rzeczywista skuteczność zależy od konkretnych warunków ramowych.

Podsumowując, wymiar ekonomiczny modułów kontenerowych został w niniejszej pracy przeanalizowany w sposób usystematyzowany z uwzględnieniem czasu budowy, kosztów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych. Potencjał ekonomiczny wynika przede wszystkim z równoległego przebiegu procesów, krótkiego czasu montażu oraz standaryzacji przy odpowiedniej skali produkcji (por. Bertram i in., 2019, s. 5). Ograniczenia pojawiają się zwłaszcza wtedy, gdy wysoki stopień indywidualizacji, złożone interfejsy, dodatkowe wymagania techniczne lub dostosowania do konkretnej lokalizacji powodują wzrost kosztów. Wskaźniki ekonomiczne pełnią zatem funkcję ram oceny, które pozwalają przejrzyście określić potencjał ekonomiczny, ograniczenia

i warunki zastosowania modułów kontenerowych w kontekście miejskim oraz, w miarę możliwości, odnieść je do konwencjonalnych metod budowlanych.

3.3 Czynniki technologiczne

W niniejszej pracy czynniki technologiczne rozumiane są jako techniczno-cyfrowe warunki, dzięki którym moduły mieszkalne oparte na kontenerach mogą stać się jednostkami przystosowanymi do koncepcji smart living oraz otwierać możliwości funkcjonalne i operacyjne podczas eksploatacji. W centrum uwagi znajdują się monitorowanie, czujniki, integracja z Internetem rzeczy (IoT) oraz funkcje sterowania i automatyzacji. Należy przy tym wyraźnie rozróżnić sam czynnik technologiczny od jego możliwych efektów: oszczędności energii lub kosztów nie są czynnikiem technologicznym jako takim, lecz rezultatem sprawnie funkcjonującego, cyfrowo wspieranego zarządzania budynkiem. Wymiar technologiczny ocenia się zatem na podstawie dwóch ściśle powiązanych aspektów: po pierwsze, zakresu monitorowania, czyli tego, jakie istotne zużycia i stany są faktycznie rejestrowane, a po drugie, potencjału oszczędnościowego i optymalizacyjnego wynikającego z cyfrowego sterowania w porównaniu z eksploatacją bez odpowiednich funkcji inteligentnych (por. ISO 52120-1, 2022).

Monitorowanie stanowi podstawę zarządzania budynkiem opartego na danych. Kluczowe znaczenie ma liczba i rodzaj dostępnych punktów pomiarowych oraz stopień szczegółowości gromadzonych danych. Zazwyczaj dotyczy to zużycia energii elektrycznej, ciepła i wody – najlepiej w podziale na lokale mieszkalne lub strefy użytkowe – a także parametrów uzupełniających, takich jak temperatura w pomieszczeniach, wilgotność powietrza, stężenie CO_2, czujniki otwarcia okien czy wskaźniki obecności. Im bardziej kompleksowe, a zarazem praktycznie użyteczne jest gromadzenie danych, tym łatwiej rozpoznać wzorce zużycia, zidentyfikować nieprawidłowości w działaniu oraz formułować wnioski na potrzeby decyzji operacyjnych (por. O'Grady i in., 2021).

Zakres monitorowania rozumiany jest w niniejszej pracy jako ustrukturyzowany stopień możliwości rejestrowania istotnych wielkości pomiarowych. Decydujące znaczenie ma nie tylko samo istnienie pulpitu informacyjnego, lecz także to, czy zebrane dane można faktycznie analizować w trakcie eksploatacji i wykorzystywać do podejmowania działań.

Można to zilustrować na przykładzie typowych zastosowań smart living w przestrzeni mieszkalnej. Należą do nich między innymi oddzielne pomiary zużycia energii elektrycznej, ciepła i wody, regulacja ogrzewania zależna od temperatury lub obecności osób, wentylacja sterowana poziomem CO_2, automatyczne obniżanie temperatury ogrzewania przy otwartym oknie czy wczesne wykrywanie nieprawidłowości technicznych na podstawie nietypowych trendów zużycia. Takie zastosowania pokazują, że czynniki technologiczne nie ograniczają się do abstrakcyjnych struktur informatycznych, lecz bezpośrednio wpływają na codzienną eksploatację budynku. W kontekście mieszkaniowym kluczowe znaczenie ma zatem to, czy systemy są niezawodne, zrozumiałe i sensownie zintegrowane z praktyką użytkowania.

Z technicznego punktu widzenia koncepcję smart living w modułach kontenerowych można opisać jako łańcuch obejmujący czujniki, transmisję danych, analizę i sterowanie. Czujniki i liczniki rejestrują stany oraz zużycie, bramki lub podobne interfejsy komunikacyjne przekazują dane do lokalnej lub chmurowej warstwy analitycznej, a na tej podstawie informacje są wizualizowane albo przekazywane do elementów wykonawczych w postaci automatycznych poleceń sterujących. Typowa architektura systemu obejmuje zatem punkty pomiarowe, infrastrukturę komunikacyjną, logikę analizy, interfejsy użytkownika dla mieszkańców lub operatorów, a także – przy wyższym stopniu automatyzacji –

bezpośrednie sterowanie instalacjami technicznymi, takimi jak ogrzewanie, wentylacja czy oświetlenie. Dopiero dzięki temu współdziałaniu powstaje system smart living nadający się do operacyjnego wykorzystania (por. ISO 52120-1, 2022).

W ocenie technologicznej warto ponadto rozróżnić stopnie automatyzacji. Pierwszy poziom obejmuje tryb wyłącznie monitorujący, w którym dane są jedynie rejestrowane i wyświetlane. Na drugim poziomie systemy cyfrowe wspierają decyzje operacyjne, ale nie ingerują bezpośrednio; interwencje pozostają nadal w gestii użytkowników lub operatorów. Trzeci poziom obejmuje częściowo zautomatyzowane systemy regulacyjne, w których zdefiniowane reakcje – takie jak obniżenie temperatury ogrzewania, dostosowanie wentylacji lub przesunięcie obciążenia – następują automatycznie w odpowiedzi na określone wartości pomiarowe lub stany. Możliwe są również bardziej zintegrowane systemy, w których kilka instalacji technicznych współpracuje w sieci (por. ISO 52120-1, 2022). W przypadku budynków mieszkalnych rozróżnienie to ma duże znaczenie, ponieważ nie każde wyposażenie cyfrowe oznacza wysoki stopień inteligentnej automatyzacji. Sam cyfrowy pulpit informacyjny nie zapewnia jeszcze zoptymalizowanej eksploatacji, jeśli na podstawie danych nie są wyprowadzane skuteczne działania lub jeśli działania te nie są automatycznie wdrażane.

Na tej podstawie opiera się inteligentne sterowanie. Obejmuje ono aktywne regulowanie zużycia energii i komfortu poprzez zautomatyzowane lub częściowo zautomatyzowane strategie regulacyjne. Typowymi zastosowaniami są sterowanie ogrzewaniem i wentylacją dostosowane do zapotrzebowania, oświetlenie sterowane czasowo lub w zależności od obecności osób, a także optymalizacja zarządzania ciepłą wodą i obciążeniem. Wartość dodana technologii wynika z tego, że systemy nie działają sztywno według ustalonych harmonogramów, lecz reagują na aktualne wartości pomiarowe. Przykładami są regulacja ogrzewania oparta na rzeczywistych temperaturach w pomieszczeniach i profilach użytkowania, wentylacja reagująca na mierzoną jakość powietrza czy automatyczne obniżanie temperatury przy otwartym oknie (por. Qiang i in., 2023). Do tego obszaru należy również wczesne wykrywanie usterek, na przykład poprzez nietypowe wzorce zużycia lub przebiegi temperatury, ponieważ ułatwia to planowanie konserwacji i pozwala szybciej korygować nieefektywne stany pracy (por. Ekanayaka Gunasinghalge i in., 2025).

Moduły kontenerowe oferują w tym zakresie konkretną zaletę: technologie cyfrowe można zintegrować w sposób standaryzowany już w fabryce. Czujniki, okablowanie, infrastruktura sieciowa i komponenty techniczne mogą być montowane, testowane i dokumentowane w kontrolowanych warunkach. Może to podnieść jakość techniczną, ograniczyć problemy z interfejsami oraz uprościć uruchomienie. Otwiera to nowe możliwości zwłaszcza w przypadku powtarzalnych układów funkcjonalnych i standardowego wyposażenia, ponieważ systemy techniczne nie muszą być za każdym razem projektowane od podstaw. Jednocześnie pojawiają się jednak nowe wymagania. Systemy muszą być interoperacyjne, aby czujniki, elementy wykonawcze i instalacje techniczne budynku niezawodnie ze sobą współpracowały (por. ISO 52120-1, 2022). Niezbędna jest również stabilna infrastruktura informatyczna, odpowiednie kanały komunikacyjne, a w razie potrzeby bramki lub połączenia z chmurą, jak również przestrzeganie wymogów ochrony danych i bezpieczeństwa informatycznego.

Rzeczywista użyteczność systemów technicznych w kontekście mieszkaniowym zależy jednak nie tylko od ich instalacji, lecz także w znacznym stopniu od sposobu funkcjonowania w praktyce. Zachowania użytkowników, akceptacja rozwiązań i nakłady na konserwację decydują o tym, czy systemy smart living faktycznie realizują swój potencjał. Jeśli systemy są niezrozumiałe, postrzegane jako uciążliwe lub obchodzone w codziennym użytkowaniu, ich użyteczność może znacząco spaść.

Podobnie dzieje się wtedy, gdy czujniki ulegają awarii, dane nie są analizowane albo strategie regulacyjne nie są dostosowywane w trakcie eksploatacji. Rozwiązania technologiczne są więc skuteczne długofalowo tylko wtedy, gdy nie tylko działają technicznie, lecz także są łatwe w obsłudze, możliwe do konserwacji i organizacyjnie włączone w zarządzanie budynkiem.

Jako wskaźnik wyniku przyjęto w niniejszej pracy potencjalną oszczędność wynikającą z cyfrowego sterowania. Opisuje się ją jako redukcję procentową lub w kWh/m²a w porównaniu z trybem referencyjnym bez funkcji inteligentnych (por. ISO 52120-1, 2022). Należy jednak pamiętać, że oszczędności nie pojawiają się automatycznie. Zależą od tego, czy dane z monitoringu są rzeczywiście analizowane, czy strategie regulacji są odpowiednio skonfigurowane, czy systemy są konserwowane oraz czy są akceptowane przez użytkowników. W ramach oceny technologicznej bada się zatem, czy moduły kontenerowe zapewniają warunki niezbędne do zoptymalizowanej eksploatacji: wystarczającą mierzalność, sensowną sterowalność, odpowiednią integrację systemową oraz bezpieczną i łatwą w utrzymaniu architekturę techniczną. Na tej podstawie można wiarygodnie oszacować potencjał technologiczny w rzeczywistych warunkach eksploatacji (por. Zangheri i in., 2019, s. 19–21).

Podsumowując, wymiar technologiczny modułów kontenerowych nabiera znaczenia przede wszystkim wtedy, gdy systemy cyfrowe są nie tylko dostępne, lecz także funkcjonalnie zintegrowane z eksploatacją i użytkowaniem. Potencjał wynika w szczególności z fabrycznej integracji, standaryzowanego wyposażenia technicznego oraz możliwości wczesnego włączenia monitorowania i sterowania do koncepcji budynku. Jednocześnie korzyści technologiczne zależą od określonych warunków: odpowiedniej architektury systemowej, właściwego stopnia automatyzacji, interoperacyjności, łatwości konserwacji oraz akceptacji w praktyce eksploatacyjnej. Smart living nie powinien być zatem postrzegany jako zwykłe wyposażenie dodatkowe, lecz jako jakościowo istotny element funkcjonowania budynku.

4. Wyniki i scenariusze praktyczne

4.1 Zagęszczenie zabudowy

Zagęszczanie zabudowy stanowi szczególnie istotny scenariusz zastosowania modułów kontenerowych w miejskim budownictwie mieszkaniowym. Jego celem jest tworzenie dodatkowej przestrzeni mieszkalnej w ramach istniejących struktur miejskich, bez zabudowywania nowych terenów na obrzeżach miasta. Typowe działania obejmują wypełnianie luk w zabudowie, uzupełnianie dziedzińców lub stref obrzeżnych oraz nadbudowę dachów istniejących budynków. Takie lokalizacje charakteryzują się jednak zwykle ograniczoną przestrzenią, gęstą zabudową sąsiednią, trudną logistyką budowy oraz podwyższonymi wymaganiami w zakresie statyki, ochrony przed hałasem i emisjami. W tym kontekście, na podstawie czynników omówionych w rozdziale 3, można wnioskować, że moduły kontenerowe mogą – pod pewnymi warunkami – stanowić szczególnie przydatne rozwiązanie dla działań związanych z zagęszczaniem zabudowy.

Istotny potencjał tkwi w możliwości skrócenia czasu budowy. Jak wykazała analiza ekonomiczna, wysoki stopień prefabrykacji pozwala na równoległe prowadzenie procesów produkcyjnych i budowlanych. Podczas gdy na miejscu realizowane są prace związane z fundamentami, uzbrojeniem terenu lub przygotowaniem konstrukcji, moduły mogą być jednocześnie wytwarzane w zakładzie. Ma to szczególne znaczenie w przypadku projektów zagęszczania zabudowy w istniejącym środowisku miejskim, ponieważ pozwala skrócić właściwą fazę montażu. Może to ograniczyć utrudnienia dla

mieszkańców i dotychczasowych użytkowników, na przykład poprzez zmniejszenie ruchu budowlanego, obniżenie poziomu hałasu i zapylenia oraz skrócenie okresów zamknięć dróg lub ograniczeń w użytkowaniu. W gęsto zabudowanym środowisku miejskim aspekt ten ma znaczenie nie tylko organizacyjne, lecz także ekonomiczne i społeczne.

Także pod względem statycznym moduły kontenerowe mogą być korzystnym rozwiązaniem przy nadbudowach dachowych. Wiele istniejących budynków dysponuje jedynie ograniczonymi rezerwami nośności, dlatego dodatkowe obciążenia należy ograniczać do minimum. Szczególnie odpowiednie wydają się zatem prefabrykowane moduły mieszkalne o zoptymalizowanej konstrukcji ramowej lub lekkiej, a nie ciężkie, adaptowane kontenery towarowe. Dzięki odpowiednio dostosowanej konstrukcji można zmniejszyć ciężar własny w porównaniu z masywnymi rozwiązaniami konwencjonalnymi. Może to zwiększyć przydatność modułów do nadbudowy dachów i ograniczyć potrzebę wzmacniania istniejącej konstrukcji. Przydatność statyczną należy jednak zawsze sprawdzać indywidualnie dla konkretnego obiektu. Potencjalna zaleta nie polega zatem na ogólnej lekkości konstrukcji, lecz na możliwości dostosowania modułów do nośności istniejącego budynku.

Również pod względem ekologicznym zagęszczanie zabudowy z wykorzystaniem modułów kontenerowych może wykazywać istotny potencjał. Jak wyjaśniono w rozdziale 3.1, korzyści ekologiczne nie pojawiają się jednak automatycznie, lecz zależą od doboru materiałów, efektywności energetycznej oraz rzeczywistej cyrkularności. Zaletą jest przede wszystkim to, że dzięki wykorzystaniu terenów już zagospodarowanych można uniknąć dodatkowego zajmowania powierzchni. Jeśli moduły kontenerowe zostaną ponadto wyposażone w energooszczędne przegrody zewnętrzne, szczelne połączenia i odpowiednie instalacje techniczne, mogą przyczynić się do bardziej zrównoważonego rozwoju dzielnicy. Prefabrykacja przemysłowa, w porównaniu z konwencjonalnym wytwarzaniem na placu budowy, stwarza ponadto możliwości ograniczenia strat materiałowych, odpadów budowlanych oraz obciążenia środowiska związanego z budową. Ma to szczególne znaczenie w kontekście zagęszczania zabudowy, ponieważ wpływ na środowisko jest tu oceniany nie tylko przez pryzmat bilansu cyklu życia, lecz także poprzez bezpośrednie obciążenie przestrzeni miejskiej.

Wymiar technologiczny może dodatkowo wzmocnić tę przydatność. W gęsto zabudowanych dzielnicach, w których efektywność energetyczna, przejrzystość zużycia zasobów i optymalizacja eksploatacji zyskują coraz większe znaczenie, wstępnie zintegrowane technologie smart living mogą zapewnić funkcjonalną wartość dodaną. Jak przedstawiono w rozdziale 3.3, ich korzyść nie polega wyłącznie na instalacji systemów cyfrowych, lecz na ukierunkowanym wykorzystaniu danych z monitoringu i danych dotyczących zużycia w celu optymalizacji eksploatacji. W projektach zagęszczania zabudowy oznacza to, że modułowe jednostki mieszkalne mogą być już w fabryce wyposażone w czujniki, infrastrukturę pomiarową i technikę sterowania. Dzięki temu zużycie energii, klimat w pomieszczeniach oraz nieprawidłowości techniczne można rejestrować w sposób bardziej przejrzysty i, w razie potrzeby, regulować zgodnie z zapotrzebowaniem. Szczególnie w przypadku mniejszych jednostek mieszkalnych lub nadbudów w istniejących budynkach może to sprzyjać bardziej efektywnej i lepiej kontrolowanej eksploatacji.

Ogólnie rzecz biorąc, powyższa analiza wskazuje, że moduły kontenerowe stanowią realny, a w odpowiednich warunkach szczególnie użyteczny scenariusz zastosowania w działaniach związanych z zagęszczaniem zabudowy. Potencjalne zalety wynikają przede wszystkim ze skrócenia czasu budowy, wysokiego stopnia prefabrykacji, elastyczności konstrukcyjnej przy nadbudowach dachowych oraz możliwości wdrażania rozwiązań energooszczędnych i zintegrowanych

technologicznie. Jednocześnie ich przydatność zależy od jasno określonych warunków: konieczna jest odpowiednia standaryzacja, precyzyjne zaplanowanie połączeń z istniejącą zabudową oraz indywidualna weryfikacja statyki, fizyki budowli i możliwości uzyskania pozwoleń. Moduły kontenerowe nie są zatem rozwiązaniem optymalnym w każdym przypadku, jednak w obszarze miejskiego zagęszczania zabudowy wykazują szczególnie duży potencjał zastosowania.

4.2 Wykorzystanie tymczasowe

Wykorzystanie tymczasowe stanowi kolejny kluczowy scenariusz zastosowania modułów kontenerowych w miejskim kontekście mieszkaniowym. Ma ono szczególne znaczenie tam, gdzie zapotrzebowanie na powierzchnię mieszkalną pojawia się szybko, jest ograniczone czasowo lub ulega znacznym wahaniom. Typowymi przykładami są domy studenckie, zakwaterowanie dla osób odbywających praktyki lub kształcenie zawodowe, mieszkania przejściowe na czas remontu lub budowy nowych obiektów, a także oferty tymczasowe w rozwijających się dzielnicach miejskich. Charakteryzują się one zmiennymi potrzebami, ograniczonym okresem użytkowania oraz dużą presją czasu i kosztów. W tym kontekście, na podstawie czynników omówionych w rozdziale 3, można wnioskować, że moduły kontenerowe mogą – pod pewnymi warunkami – szczególnie dobrze odpowiadać potrzebom tymczasowych form mieszkaniowych.

Istotnym atutem jest krótki czas realizacji. Potrzeba zapewnienia tymczasowego zakwaterowania często pojawia się nagle i trudno ją zaplanować z dużym wyprzedzeniem. Tradycyjne metody budowlane szybko napotykają tu ograniczenia, ponieważ planowanie i realizacja są zwykle ukierunkowane na długoterminowe koncepcje użytkowania i wymagają odpowiednio długiego czasu przygotowań. Moduły kontenerowe, dzięki wysokiemu stopniowi prefabrykacji, umożliwiają natomiast równoległe prowadzenie procesów produkcyjnych i budowlanych. Podczas gdy na miejscu trwają niezbędne przygotowania, moduły mogą być jednocześnie produkowane w fabryce. Dzięki temu można skrócić czas budowy. Ma to szczególne znaczenie w przypadku takich form mieszkaniowych jak domy studenckie, ponieważ powierzchnia mieszkalna często musi być gotowa w określonym terminie, na przykład na początku semestru. Skrócony czas montażu może zatem nie tylko poprawić wykonalność organizacyjną, lecz także zwiększyć zdolność do elastycznego reagowania na krótkoterminowe wzrosty popytu.

Również z ekonomicznego punktu widzenia wykorzystanie tymczasowe wydaje się odpowiednim obszarem zastosowania. Jak przedstawiono w rozdziale 3.2, potencjał ekonomiczny pojawia się przede wszystkim wtedy, gdy skutecznie wykorzystywane są standaryzacja, produkcja seryjna i skrócone terminy budowy. W przypadku użytkowania tymczasowego gotowość do ponoszenia kosztów rozwiązań silnie zindywidualizowanych lub zaprojektowanych z myślą o trwałym użytkowaniu jest często ograniczona. Na pierwszy plan wysuwają się funkcjonalne, szybko dostępne i możliwe do skalkulowania oferty mieszkaniowe. Moduły kontenerowe mogą w takich warunkach przynosić korzyści, ponieważ można je realizować jako standaryzowane jednostki o powtarzalnych układach funkcjonalnych i wstępnie zintegrowanej technice. Dzięki temu koszty inwestycyjne można niekiedy obniżyć lub przynajmniej oszacować w bardziej wiarygodny sposób. Korzyści ekonomiczne nie wynikają jednak automatycznie. Zależą od liczby modułów, stopnia standaryzacji, nakładów transportowych oraz konkretnych wymagań lokalizacyjnych. W kontekście tymczasowym warunki te są jednak często spełnione w większym stopniu niż w przypadku długoterminowych, indywidualnie planowanych projektów mieszkaniowych.

Kluczowym aspektem jest ponadto możliwość przenoszenia i ponownego wykorzystania modułów. Podczas gdy tradycyjne budynki są zazwyczaj trwale związane z jedną lokalizacją, modułowe systemy kontenerowe można zaprojektować tak, aby po zakończeniu danej fazy użytkowania dało się je zdemontować, przetransportować i ponownie wykorzystać w innym miejscu. W ten sposób zmienia się ekonomiczna i ekologiczna logika budowania: koszty inwestycyjne nie muszą już odnosić się do jednej lokalizacji lub jednego cyklu użytkowania, lecz mogą zostać rozłożone na kilka faz eksploatacji. Również nakłady produkcyjne i emisje wbudowane można rozpatrywać w ujęciu wieloletnim, obejmującym kilka okresów użytkowania. Jak wykazano w rozdziale 3.1, potencjał ten wiąże się jednak z jasno określonymi warunkami: konieczne są trwałe konstrukcje, standaryzowane interfejsy, rozłączalne połączenia oraz odpowiednie ramy prawne i organizacyjne. Tylko wtedy, gdy warunki te rzeczywiście zostaną spełnione, tymczasowe formy mieszkaniowe mogą przynieść istotną wartość dodaną w porównaniu z konwencjonalnymi metodami budowlanymi.

Wymiar technologiczny może dodatkowo wzmocnić tę przydatność. Tymczasowe osiedla mieszkaniowe często muszą być sprawnie zorganizowane i eksploatowane przy możliwie niewielkich nakładach operacyjnych. Wstępnie zintegrowane komponenty smart living mogą tu zapewnić praktyczne korzyści. Jak wyjaśniono w rozdziale 3.3, wartość dodana nie polega wyłącznie na wyposażeniu cyfrowym, lecz na sensownej integracji monitoringu, czujników i sterowania. Szczególnie przy zmiennym obłożeniu standardowe, fabrycznie zainstalowane systemy mogą przynosić korzyści, na przykład poprzez przejrzyste rejestrowanie zużycia energii i wody, sterowanie ogrzewaniem i wentylacją dostosowane do potrzeb lub wczesne wykrywanie awarii technicznych. Może to uprościć eksploatację oraz zmniejszyć zużycie i nakłady na konserwację. W obiektach, w których często zmieniają się użytkownicy, szczególnie ważne jest niezawodne i możliwie nieskomplikowane zarządzanie budynkiem.

Również z ekologicznego punktu widzenia scenariusz tymczasowego użytkowania ma istotne znaczenie. Tymczasowe zapotrzebowanie na mieszkania nie powinno być, w miarę możliwości, zaspokajane za pomocą rozwiązań wymagających dużych nakładów budowlanych i materiałowych, które po krótkim czasie trzeba ponownie rozebrać. Moduły kontenerowe mogą być ekologicznie uzasadnione, jeśli ich wykorzystanie stanowi część koncepcji wielokrotnego użycia i nie prowadzi do jednorazowego zużycia zasobów. Zalety ekologiczne wynikają więc nie tyle z samego wzniesienia obiektu, ile z możliwości jego ponownego wykorzystania. Ponadto wysoki stopień prefabrykacji i skrócony czas trwania budowy mogą przyczynić się do zmniejszenia obciążenia środowiska miejskiego związanego z pracami budowlanymi. Potencjał ten traci jednak na znaczeniu, jeśli nie uwzględnia się konsekwentnie jakości energetycznej, doboru materiałów oraz faktycznego ponownego wykorzystania.

W kontekście tymczasowych form mieszkaniowych należy uwzględnić również aspekty społeczne i użytkowe. Funkcjonalne i szybko realizowane oferty mieszkaniowe nie oznaczają automatycznie dobrej jakości mieszkania. Decydujące znaczenie ma raczej to, czy dostęp do światła dziennego, klimat w pomieszczeniach, izolacja akustyczna, prywatność oraz praktyczna użyteczność w codziennym życiu pozostają w odpowiedniej relacji do planowanego okresu użytkowania. Istotną rolę odgrywa również akceptacja ze strony użytkowników i otoczenia, ponieważ formy mieszkaniowe oparte na kontenerach bywają postrzegane jako prowizoryczne lub mogą podlegać stygmatyzacji. Dlatego w przypadku mieszkań studenckich lub przejściowych należy sprawdzić, czy standard budowlany i społeczny jest nie tylko funkcjonalny krótkoterminowo, lecz także adekwatny do rzeczywistych warunków użytkowania.

Należy ponadto pamiętać, że tymczasowe formy mieszkaniowe w praktyce często funkcjonują dłużej, niż pierwotnie zakładano. Obiekt zaplanowany jako rozwiązanie przejściowe może faktycznie stać się rozwiązaniem stałym, jeśli niedobór mieszkań się utrzymuje lub brakuje rozwiązań alternatywnych. W takim przypadku znacząco rosną wymagania dotyczące jakości mieszkania, trwałości, konserwacji i akceptacji społecznej. To, co wydaje się odpowiednie dla użytkowania tymczasowego, nie musi automatycznie nadawać się do eksploatacji długoterminowej. Ocena tymczasowych modułów kontenerowych powinna zatem odnosić się nie tylko do planowanej, lecz także do potencjalnie przedłużonej perspektywy użytkowania.

Ogólnie rzecz biorąc, powyższa analiza wskazuje, że moduły kontenerowe stanowią realny, a w odpowiednich warunkach szczególnie użyteczny scenariusz zastosowania w przypadku tymczasowych form mieszkaniowych, takich jak domy studenckie lub mieszkania przejściowe. Potencjalne zalety wynikają przede wszystkim z krótkiego czasu realizacji, możliwości standaryzacji, ponownego wykorzystania oraz wstępnej integracji technicznej. Jednocześnie ich przydatność zależy od jasno określonych warunków: konieczne są ekonomicznie opłacalne ramy działania, rzeczywista logika ponownego wykorzystania, funkcjonalny i społecznie odpowiedni standard mieszkaniowy, a także uwzględnienie ryzyka, że rozwiązania tymczasowe będą funkcjonować dłużej, niż pierwotnie planowano. Moduły kontenerowe nie są zatem także w kontekście tymczasowym rozwiązaniem z zasady lepszym, mogą jednak w odpowiednich warunkach wnieść znaczący wkład w elastyczne zapewnianie przestrzeni mieszkaniowej w miastach.

5. Krytyczna ocena i dyskusja

Przedstawiona powyżej analiza wskazuje, że moduły kontenerowe mają istotny potencjał w kontekście mieszkalnictwa miejskiego, zwłaszcza w przypadku zagęszczania zabudowy i zastosowań tymczasowych. Ich zalety wynikają przede wszystkim z wysokiego stopnia prefabrykacji, możliwości skrócenia czasu montażu oraz integracji systemów technicznych już na etapie produkcji fabrycznej. Nie można jednak na tej podstawie wnioskować o ich zasadniczej przewadze nad konwencjonalnymi metodami budowlanymi. Przydatność modułów kontenerowych zależy w dużym stopniu od konkretnych uwarunkowań budowlanych, ekonomicznych, technicznych i organizacyjnych.

Z ekonomicznego punktu widzenia kluczowy potencjał stanowi przede wszystkim skrócony czas realizacji. Zwłaszcza w gęsto zabudowanych miastach krótsze etapy budowy mogą ograniczać utrudnienia, wyzwania logistyczne oraz dodatkowe koszty związane z opóźnieniami. Skrócony czas budowy nie oznacza jednak automatycznie niższych kosztów całkowitych. Korzyści ekonomiczne wynikają w szczególności ze standaryzacji, powtarzalności oraz niewielkiego zakresu koniecznych dostosowań. Wysoki stopień indywidualizacji, złożone warunki lokalizacyjne lub dodatkowe wymogi regulacyjne mogą znacząco osłabić te efekty. Atrakcyjność ekonomiczna modułów kontenerowych nie jest zatem regułą, lecz zależy od konkretnego kontekstu.

Także pod względem ekologicznym ocena jest zróżnicowana. Dzięki przemysłowej prefabrykacji, mniejszym stratom materiałowym i możliwości ponownego wykorzystania moduły kontenerowe mogą stwarzać szanse ekologiczne, zwłaszcza gdy są używane wielokrotnie lub przenoszone do innych lokalizacji. Pozytywny bilans środowiskowy nie jest jednak oczywisty. Zależy on w znacznym stopniu od doboru materiałów, efektywności energetycznej, konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego oraz rzeczywistego obiegu materiałowego. Szczególnie konstrukcje stalowe mogą generować wysokie emisje w fazie produkcji, jeśli nie zostaną one zrównoważone długim okresem użytkowania lub konsekwentnym ponownym wykorzystaniem.

Również pod względem technologicznym systemy modułowe stwarzają nowe możliwości, ponieważ pozwalają na wczesną integrację technologii monitorowania, czujników i sterowania. Mogą dzięki temu wspierać przejrzystość, możliwość regulacji oraz bardziej efektywną eksploatację budynków. Rzeczywista wartość dodana systemów cyfrowych pojawia się jednak dopiero wtedy, gdy są one interoperacyjne, łatwe w konserwacji i użyteczne w codziennej praktyce. Ponadto rozwiązania z zakresu smart living stawiają wyższe wymagania w zakresie ochrony danych, bezpieczeństwa informatycznego oraz długoterminowej organizacji eksploatacji. Samo wyposażenie technologiczne nie gwarantuje więc jeszcze zoptymalizowanego funkcjonowania budynku.

Należy również uwzględnić, że ocena form mieszkaniowych opartych na kontenerach nie może opierać się wyłącznie na kryteriach ekonomicznych, ekologicznych i technologicznych. Ważną rolę odgrywają także aspekty społeczne, takie jak komfort mieszkania, klimat w pomieszczeniach, izolacja akustyczna, prywatność oraz praktyczna użyteczność przestrzeni mieszkalnej w codziennym życiu. Równie istotna jest społeczna akceptacja takich form mieszkaniowych. Moduły kontenerowe mogą być postrzegane jako rozwiązania prowizoryczne, gorszej jakości lub stygmatyzujące, zwłaszcza jeśli kojarzą się ze schroniskami dla bezdomnych albo rozwiązaniami czysto przejściowymi. Dla rzetelnej oceny kluczowe jest zatem to, czy formy mieszkaniowe oparte na kontenerach można zaprojektować tak, aby były nie tylko funkcjonalne i efektywne, lecz także społecznie odpowiednie i trwale akceptowalne.

Jednocześnie należy uwzględnić ograniczenia metodologiczne niniejszego artykułu. Przedstawione wnioski opierają się na analizie literatury oraz podejściu analityczno-koncepcyjnym. Nie jest to własne badanie empiryczne oparte na standaryzowanych danych porównawczych, analizie studiów przypadków czy pomiarach parametrów rzeczywistych projektów. Stwierdzenia dotyczące czasu budowy, kosztów, oddziaływania na środowisko i korzyści technologicznych należy zatem traktować jako merytorycznie uzasadnioną ocenę, a nie jako empirycznie zweryfikowany dowód. W szczególności bezpośrednie porównania z konwencjonalnymi metodami budowlanymi pozostają zależne od warunków ramowych, granic systemu i typów projektów dostępnych w literaturze.

Ogólnie rzecz biorąc, moduły kontenerowe sprawdzają się szczególnie tam, gdzie współwystępują presja czasu, niedobór powierzchni oraz elastyczne wymagania użytkowe. Potencjał widoczny jest przede wszystkim w projektach zagęszczania zabudowy oraz w tymczasowych formach mieszkaniowych. Ograniczenia ujawniają się natomiast tam, gdzie występują wysoki stopień indywidualizacji, złożone wymagania techniczne, niekorzystne warunki lokalizacyjne lub niewystarczająca akceptacja społeczna. Moduły kontenerowe nie są więc uniwersalnym rozwiązaniem problemu niedoboru mieszkań w miastach, lecz w określonych warunkach mogą stanowić merytorycznie uzasadnione i elastyczne narzędzie jego częściowego łagodzenia.

6. Podsumowanie i perspektywy

Celem niniejszej pracy była analiza modułowych form mieszkaniowych opartych na kontenerach jako potencjalnego rozwiązania dla zagęszczonych przestrzeni miejskich z perspektywy ekologicznej, ekonomicznej i technologicznej. W centrum uwagi znalazło się pytanie, jaki potencjał i jakie ograniczenia wykazuje ta metoda budowania w porównaniu z konwencjonalnymi, trwale związanymi z lokalizacją formami budownictwa w kontekście miejskim. Literatura oraz analiza koncepcyjna wskazują, że moduły kontenerowe mają w badanych wymiarach istotny potencjał, którego rzeczywista skuteczność zależy jednak silnie od konkretnych warunków zastosowania.

Potencjał ten wydaje się szczególnie przekonujący w przypadku projektów zagęszczania zabudowy oraz tymczasowych form użytkowania. W istniejącej zabudowie miejskiej moduły kontenerowe, dzięki wysokiemu stopniowi prefabrykacji i możliwości skrócenia czasu montażu, mogą ograniczać zakres ingerencji budowlanych, uciążliwości i obciążeń logistycznych. W przypadku tymczasowych form mieszkaniowych dodatkowe znaczenie ma to, że moduły mogą być zasadniczo projektowane jako rozwiązania przenośne i wielokrotnego użytku. Wydają się zatem szczególnie odpowiednie tam, gdzie współwystępują presja czasu, niedobór powierzchni i elastyczne potrzeby użytkowe.

Jednocześnie należy podkreślić, że omawiana metoda budowania nie jest automatycznie lepsza pod względem ekologicznym, ekonomicznym ani technologicznym. Korzyści wynikające z krótkiego czasu budowy i standaryzacji mogą zostać osłabione przez wysoki stopień indywidualizacji, złożone interfejsy lub dodatkowe wymagania. Pozytywny bilans ekologiczny jest natomiast wiarygodny jedynie wtedy, gdy dobór materiałów, jakość energetyczna i rzeczywiste ponowne wykorzystanie są konsekwentnie ze sobą powiązane. W wymiarze technologicznym okazuje się ponadto, że funkcje smart living mogą przynieść trwałą wartość dodaną tylko wtedy, gdy monitoring, sterowanie, interoperacyjność i łatwość konserwacji są niezawodnie zapewnione w późniejszej eksploatacji.

Podsumowując, literatura oraz analiza koncepcyjna wskazują na zależny od kontekstu potencjał modułów kontenerowych w miejskim budownictwie mieszkaniowym. Dotyczy on przede wszystkim czasu realizacji, elastyczności funkcjonalnej oraz możliwości wstępnej integracji technologicznej. Potencjał ten ujawnia się jednak głównie w konkretnych scenariuszach zastosowania i wymaga spełnienia określonych warunków planistycznych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Moduły kontenerowe nie stanowią zatem ogólnego rozwiązania problemu niedoboru mieszkań w miastach, ale w odpowiednich warunkach mogą istotnie wspierać bardziej elastyczne i zrównoważone tworzenie przestrzeni mieszkaniowej.

W dalszych badaniach wskazane byłoby pogłębienie przedstawionych rozważań poprzez konkretne studia przypadków oraz dane porównawcze zrealizowanych projektów. Szczególnie wartościowe byłyby rzetelne analizy cyklu życia, standaryzowane porównania kosztów oraz dane empiryczne dotyczące rzeczywistego zużycia energii i praktycznego wykorzystania systemów monitorowania. Pozwoliłoby to w przyszłości precyzyjniej i bardziej wiarygodnie ocenić potencjał modułów kontenerowych.

Bibliografia

Algeco. (2025). Gestapelte Containerwohnungen. https://www.algeco.de/index.php?rex_media_type=content_medium&rex_media_file=apart-ausstattung04.jpg

Baltrocchi, A. P. D., Shafique, M., & Torretta, V. (2026). A Systematic Review on Life Cycle Assessment of Prefabricated Buildings. Sustainable Horizons, 17, 100168. https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100168

Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G., & Woetzel, J. (2019). Modular construction: From projects to products. Capital Projects.

BigBox Berlin. (2018). Produktion Containermodul. https://bigboxberlin.de/wp-content/uploads/2018/07/bigboxberlin-container-freie-universitaet-4.jpg

Ekanayaka Gunasinghalge, L. U. G., Alazab, A., & Talukder, Md. A. (2025). Artificial intelligence for energy optimization in smart buildings: A systematic review and meta-analysis. Energy Informatics, 8(1), 135. https://doi.org/10.1186/s42162-025-00592-8

Guaygua, B., Sánchez-Garrido, A. J., & Yepes, V. (2024). Life cycle assessment of seismic resistant prefabricated modular buildings. Heliyon, 10(20), e39458. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39458

ISO 52120-1:2021. (2022). ISO. https://www.iso.org/standard/65883.html

Kamali, M., & Hewage, K. (2016). Life cycle performance of modular buildings: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 1171–1183. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031

Kamali, M., Hewage, K., & Sadiq, R. (2022). Economic sustainability benchmarking of modular homes: A life cycle thinking approach. Journal of Cleaner Production, 348, 131290. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131290

Lee, J.-S., & Kim, Y.-S. (2017). Analysis of cost-increasing risk factors in modular construction in Korea using FMEA. KSCE Journal of Civil Engineering, 21(6), 1999–2010. https://doi.org/10.1007/s12205-016-0194-1

Licdn. (2026). Beispiel IoT Dashboard. https://media.licdn.com/dms/image/v2/D5612AQFPBVmgAPjgAg/article-cover_image-shrink_720_1280/B56ZdDpd_LGQAM-/0/1749186640387?e=2147483647&v=beta&t=PoUX_QfhQsTJjZRfJzOahRbA2ckMKFvsT2sNa2_EclA

O'Grady, T., Chong, H.-Y., & Morrison, G. M. (2021). A systematic review and meta-analysis of building automation systems. Building and Environment, 195, 107770. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107770

O'Hegarty, R., McCarthy, A., O'Hagan, J., Thanapornpakornsin, T., Raffoul, S., & Kinnane, O. (2025). Understanding the embodied carbon credentials of modern methods of construction. Buildings & Cities, 6(1). https://doi.org/10.5334/bc.515

Qiang, G., Tang, S., Hao, J., Di Sarno, L., Wu, G., & Ren, S. (2023). Building automation systems for energy and comfort management in green buildings: A critical review and future directions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 179, 113301. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113301

Quale, J., Eckelman, M. J., Williams, K. W., Sloditskie, G., & Zimmerman, J. B. (2012). Construction Matters: Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States. Journal of Industrial Ecology, 16(2), 243–253. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00424.x

Wang, Y., Lam, S.-K., Wu, Z., Gong, L., Li, H., & Jiang, M. (2025). Does the Modular Construction Project Outperform the Traditional One? A Comparative Life Cycle Analysis Study in Hong Kong. Buildings, 15(16). https://doi.org/10.3390/buildings15162811

Zangheri, P., Serrenho, T., & Bertoldi, P. (2019). Energy Savings from Feedback Systems: A Meta-Studies' Review. Energies, 12(19). https://doi.org/10.3390/en12193788

Smart Living im Containerformat:

Potenziale modularer Bauweisen für nachhaltigen urbanen Wohnraum

Jonas Jerger, Jannik Mack

Duale Hochschule Baden-Württemberg Heidenheim, Fakultät Wirtschaft, Studiengang Wirtschaftsinformatik

Abstract

Verdichtete urbane Räume stehen zunehmend unter Druck, zusätzlichen Wohnraum schnell, wirtschaftlich und zugleich nachhaltig bereitzustellen. Obwohl der modulare Wohnungsbau in der Forschung bereits breit diskutiert wird, fehlt bislang eine gezielte Betrachtung containerbasierter Wohnmodule, die ökologische, ökonomische und technologische Smart-Living-Kriterien gemeinsam berücksichtigt und auf den urbanen Kontext bezieht.

In dieser Arbeit werden unter „Container-Modulen“ nicht allgemeine modulare Bauformen verstanden, sondern transportierbare, industriell vorgefertigte Wohnraumeinheiten in containerähnlicher Rahmenbauweise, die über anschlussfähige Gebäude- und IT-Infrastruktur verfügen. Untersucht wird, welche Potenziale und Grenzen diese Bauweise im urbanen Kontext im Hinblick auf Bauzeit, Kosten, CO_2- und Energiekennzahlen sowie auf den Nutzen eines überwachungsbasierten Betriebs aufweist.

Methodisch basiert die Untersuchung auf einer literaturgestützten, indikatorbasierten Analyse entlang der drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Technologie. Die Analyse deutet darauf hin, dass containerbasierte Module insbesondere durch ihren hohen Vorfertigungsgrad, kurze Montagezeiten, flexible Einsatzmöglichkeiten und die werkseitige Integration digitaler Systeme relevante Potenziale aufweisen. Diese zeigen sich besonders bei Nachverdichtungsprojekten und temporären Wohnformen.

Gleichzeitig wird deutlich, dass diese Bauweise konventionellen Lösungen nicht grundsätzlich überlegen ist. Ökologische und ökonomische Potenziale hängen maßgeblich von Faktoren wie Standardisierung, Materialwahl, energetischer Qualität, Wiederverwendbarkeit sowie einer zuverlässigen Integration von Monitoring- und Steuerungstechnik ab.

Container-Module sind damit keine pauschale Lösung für den urbanen Wohnraummangel. Unter geeigneten Rahmenbedingungen können sie jedoch einen sinnvollen Beitrag dazu leisten, Wohnraum anpassungsfähiger, effizienter und nachhaltiger zu schaffen.

Schlüsselwörter: Smart Living; Container-Module; modularer Wohnungsbau; nachhaltiger urbaner Wohnraum; Nachverdichtung; temporäre Nutzung

1. Einleitung und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die ökologischen, ökonomischen und technologischen Potenziale sowie Grenzen containerbasierter modularer Wohnformen im Kontext verdichteter urbaner Räume literaturgestützt und indikatorbasiert zu analysieren. Im Fokus stehen dabei transportierbare, industriell vorgefertigte Wohnmodule in containerähnlicher Rahmenbauweise, die für den urbanen Wohnungsbau eingesetzt werden können.

Die Untersuchung erfolgt entlang von drei Analyseebenen. In ökologischer Hinsicht stehen insbesondere CO_2- und Energiekennzahlen sowie Aspekte der Wiederverwendbarkeit und Ressourceneffizienz im Vordergrund. In ökonomischer Hinsicht werden Bauzeit, Baukosten und Betriebskosten betrachtet. In technologischer Hinsicht wird untersucht, welchen Beitrag Monitoring-, Sensorik- und Steuerungssysteme zu einem effizienteren und transparenteren Gebäudebetrieb leisten können.

Auf dieser Grundlage wird diskutiert, unter welchen urbanen Einsatzbedingungen containerbasierte Module besonders geeignet erscheinen und welche Potenziale und Grenzen sich im Vergleich zu konventionellen, standortgebundenen Bauweisen herausarbeiten lassen. Dabei steht nicht der empirische Nachweis einer generellen Überlegenheit im Vordergrund, sondern die strukturierte Bewertung von Potenzialen, Einsatzgrenzen und Anwendungsbedingungen.

2. Material und Methoden

2.1 Anforderungen an Wohnraum der Zukunft

Um Smart Living in dieser Arbeit nicht nur als Konzept zu beschreiben, sondern für die weitere Analyse zu strukturieren, wird es in konkrete Indikatoren überführt. Aufbauend auf der Problemstellung Zeitdruck im urbanen

Bauen, Nachhaltigkeitsanforderungen sowie digital unterstützter Gebäudebetrieb, werden zentrale Anforderungen drei Dimensionen zugeordnet und als analytischer Bewertungsrahmen operationalisiert.

Tabelle 1: Smart-Living-Kriterien

Dimensionen	Smart-Living-Anforderung im urbanen Kontext	Messbarer Indikator	Einheit / Skala
Ökologisch	Ressourcenschonender, klimaverträglicher Wohnraum über den Lebenszyklus	CO_2-Kennzahl (vereinfacht: Bau/Material + Betrieb)	kg CO_2e/m² (oder kg CO_2e/m²a für Betrieb)
Ökologisch	Energieeffizienter Betrieb	Endenergiebedarf bzw. -verbrauch im Betrieb	kWh/m²a
Ökonomisch	Schnelle Realisierung trotz urbaner Einschränkungen	Bauzeit / Realisierungsdauer	Wochen/Monate
Ökonomisch	Wirtschaftlichkeit (Investition & Betrieb)	Baukosten + Betriebskosten (Energie/Wartung)	€/m² und €/m²a
Technologisch	Transparenz & Steuerbarkeit durch Monitoring (Smart Living Kernpunkt)	Monitoring-Abdeckung: messbare Verbräuche/Parameter (Strom/Wärme/Wasser, ggf. Temperatur/Luftqualität)	Anteil (%) / Checkliste
Technologisch	Effizienzgewinn durch intelligente Steuerung	Einsparpotenzial durch Regelung/Automatisierung (gegenüber „ohne Smart“)	% oder kWh/m²a

Die in Tabelle 1 definierten Indikatoren bilden das Raster für die nachfolgende literaturgestützte Analyse containerbasierter Wohnmodule im urbanen Kontext. Betrachtet werden ökologische Kriterien wie CO_2- und Energiekennzahlen, ökonomische Kriterien wie Bauzeit sowie Bau- und Betriebskosten und technologische Kriterien wie Monitoring-Abdeckung und potenzielle Effizienzgewinne durch Steuerung. Die Indikatoren dienen dabei nicht als Grundlage einer durchgängig empirischen Vergleichsmessung, sondern als strukturierte Bewertungsmaßstäbe, um Potenziale, Grenzen und Einsatzbedingungen containerbasierter Module nachvollziehbar zu diskutieren. Soweit möglich werden Bezüge zu konventionellen, standortgebundenen Bauweisen hergestellt.

2.2 Das Container-Modul

In dieser Arbeit bezeichnet „Container-Modul“ eine transportierbare, industriell vorgefertigte Raumeinheit, die auf der Baustelle zu größeren Gebäuden gestapelt und über definierte Schnittstellen verbunden werden können. Es handelt sich dabei nicht zwingend um einen recycelten ISO-Frachtcontainer, sondern häufig um containerähnliche Wohnmodule in Rahmenbauweise, die für Statik, Wärme und Schallschutz, sowie Haustechnik ausgelegt sind. Damit ist die Untersuchungseinheit klar. Ein standardisiertes Wohnmodul mit anschlussfähiger Gebäude- und IT-Infrastruktur.

Technische Struktur & Vorfertigung: Die Module werden in einer kontrollierten Umgebung vorproduziert. Auf der Baustelle erfolgen primär Fundament/Tragstruktur, das Platzieren und Verbinden der Module sowie Medienanschlüsse und Inbetriebnahme.



Abbildung 1: Produktion Containermodul (vgl. BigBox Berlin, 2018)

Vorteile: Durch Parallelisierung von Produktion und Baustellenvorbereitung sind kurze Realisierungszeiten möglich; zudem kann die Vorfertigung die Ausführungsqualität stabilisieren und die Baustellenbelastung im urbanen Raum reduzieren. Für temporäre Nutzungen ist relevant, dass Module je nach System rückbaubar, versetzbar und wiederverwendbar sind.



Abbildung 2: Gestapelte Containerwohnungen (vgl. Algeco, 2025)

Grenzen: Herausforderungen entstehen unter anderem durch baurechtliche Anforderungen (Brand-/Schallschutz, Energie), geometrische Restriktionen (Modulmaße) und kritische Schnittstellen (Dichtheit, Anschlussdetails). Wirtschaftliche Vorteile hängen oft von Standardisierung und Stückzahl ab; stark individuelle Lösungen reduzieren Skaleneffekte.

Integrierbare Smart-Technologien: Smart Living lässt sich gut in dem ersten Produktionsschritt vorintegrieren. Für die spätere Analyse sind dann besonders Monitoring-Abdeckung und Effizienzgewinne durch Steuerung relevant.

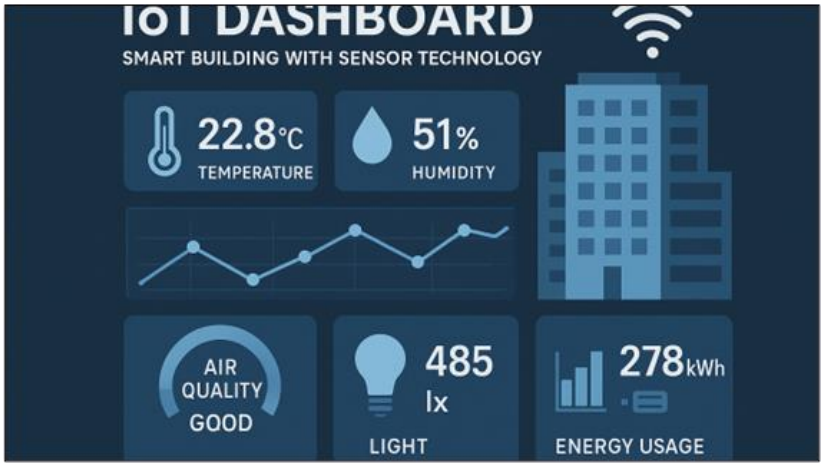


Abbildung 3: Beispiel IoT Dashboard (vgl. Licdn, 2026)

3. Analyse messbarer Faktoren

3.1 Ökologische Faktoren

Unter ökologischen Faktoren werden in dieser Arbeit messbare Umweltwirkungen verstanden, die über den Lebenszyklus eines Gebäudes entstehen. Im Mittelpunkt stehen dabei insbesondere CO_2-Emissionen, der Energieverbrauch im Betrieb, der Materialeinsatz sowie die Kreislauffähigkeit der eingesetzten Systeme (vgl. Baltrocchi et al., 2026, S. 2; Kamali & Hewage, 2016, S. 1176). Die ökologische Dimension wird damit bewusst von

ökonomischen oder organisatorischen Aspekten wie Baukosten oder Bauzeit abgegrenzt. Im Fokus steht nicht die Wirtschaftlichkeit der Bauweise, sondern ihre Umweltwirkung über Herstellung, Nutzung und potenziellen Rückbau.

Als zentraler Indikator dient eine vereinfachte CO_2-Kennzahl in kg CO_2e pro m². Diese setzt sich aus zwei wesentlichen Komponenten zusammen: den Emissionen aus Materialherstellung und Bauprozessen einerseits sowie den Emissionen aus dem Gebäudebetrieb über eine definierte Nutzungsdauer andererseits. Beide Anteile sind für die ökologische Bewertung relevant, da sich die Klimabilanz eines Gebäudes weder allein aus der Herstellungsphase noch ausschließlich aus dem Betrieb ableiten lässt, sondern aus dem Zusammenspiel beider Lebenszyklusphasen (vgl. O'Hegarty et al., 2025). Für eine belastbare Gegenüberstellung ist dabei zu berücksichtigen, dass ökologische Vergleiche nur dann aussagekräftig sind, wenn identische funktionale Bezugsgrößen, vergleichbare Systemgrenzen und eine konsistent angesetzte Nutzungsdauer zugrunde gelegt werden.

Für containerbasierte Wohnmodule ist in diesem Zusammenhang vor allem der hohe Vorfertigungsgrad von Bedeutung. Die industrielle Fertigung kann grundsätzlich Potenziale zur Reduktion baubedingter Umweltwirkungen bieten, etwa durch geringeren Materialverschnitt, reduzierte Fehlmengen und eine gleichmäßigere Ausführungsqualität unter kontrollierten Produktionsbedingungen (vgl. Quale et al., 2012, S. 244). Gleichzeitig ist eine positive ökologische Bewertung nicht automatisch gegeben. Containerähnliche Wohnmodule basieren häufig auf stahlbasierten oder anderen rahmengetragenen Konstruktionen, deren Herstellung mit hohen Emissionen verbunden sein kann (O'Hegarty et al., 2025). Zudem hängt die CO_2-Bilanz wesentlich von der konkreten konstruktiven Ausführung ab, insbesondere von Materialwahl, Dämmstandard, Innenausbau und dem Umfang technischer Ausstattung. Entscheidend ist daher nicht die Bauform allein, sondern die konkrete Ausgestaltung des Moduls sowie die Frage, ob eine tatsächliche Mehrfachnutzung oder Wiederverwendung erreicht wird.

Neben der CO_2-Kennzahl stellt die Energieeffizienz im Betrieb einen zweiten zentralen Indikator dar. Sie wird über den Endenergiebedarf beziehungsweise den Energieverbrauch in kWh/m²a erfasst. Dieser Aspekt ist besonders relevant, da ökologische Vorteile in der Herstellungsphase durch einen ineffizienten Gebäudebetrieb über die Nutzungsdauer relativiert oder sogar aufgehoben werden können. Die energetische Qualität containerbasierter Module hängt maßgeblich von der Gebäudehülle ab, insbesondere von Dämmstandard, Luftdichtheit und der Vermeidung von Wärmebrücken. Auch die Anschlussdetails an den Modulschnittstellen sowie die eingesetzte technische Gebäudeausrüstung beeinflussen die ökologische Gesamtbewertung erheblich. Gerade die Übergänge zwischen einzelnen Modulen gelten als sensible Bereiche, da hier Dichtheit und Wärmeschutz dauerhaft sichergestellt werden müssen. Zugleich kann die industrielle Vorfertigung Vorteile bieten, weil Abdichtungs- und Installationsarbeiten unter kontrollierten Bedingungen häufig präziser und reproduzierbarer ausgeführt werden können als auf einer innerstädtischen Baustelle (vgl. Kamali & Hewage, 2016, S. 1174; Quale et al., 2012, S. 244).

Ein weiterer ökologischer Einflussfaktor ist der Materialeinsatz und die damit verbundene Ressourcen- und Abfallproblematik. Durch Vorfertigung können Materialverluste reduziert werden, da Zuschnitt, Lagerung und Montage in einer planbaren Umgebung stattfinden. Nacharbeiten, Fehlbestellungen und typische Baustellenabfälle lassen sich dadurch potenziell verringern (vgl. Quale et al., 2012, S. 247). Zusätzlich können sich Umweltwirkungen im urbanen Kontext reduzieren, wenn Anlieferverkehr, Staub- und Lärmemissionen sowie logistische Aufwände infolge einer verkürzten Montagephase sinken. Liegt keine vollständige Ökobilanz vor, können Materialaspekte ergänzend über Indikatoren wie Abfallmengen, Recyclingquoten oder eine strukturierte Bewertung der Materialtrennbarkeit und Wiederverwertbarkeit erfasst werden (vgl. Kamali & Hewage, 2016, S. 1174).

Spezifisch für modulare Container-Lösungen ist zudem die Kreislauffähigkeit und potenzielle Wiederverwendbarkeit der Module. Werden diese so geplant, dass sie demontierbar, transportierbar und erneut einsetzbar sind, können die mit ihrer Herstellung verbundenen Emissionen rechnerisch auf mehrere Nutzungszyklen verteilt werden (vgl. Baltrocchi et al., 2026, S. 13). Dadurch kann sich die CO_2-Kennzahl pro Nutzungsjahr verbessern. Dieser Effekt tritt jedoch nur dann ein, wenn eine tatsächliche Wiederverwendung technisch, rechtlich und organisatorisch realistisch umgesetzt werden kann. Voraussetzungen dafür sind unter anderem standardisierte Abmessungen, lösbare Verbindungen, robuste Bauteile sowie eine nachvollziehbare Dokumentation der verbauten Materialien (vgl. Baltrocchi et al., 2026, S. 13–14).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass containerbasierte Module ökologisch nicht per se überlegen sind, jedoch unter bestimmten Bedingungen relevante Potenziale aufweisen. Diese ergeben sich insbesondere dann, wenn Vorfertigung

mit einer geeigneten Materialwahl, einer hohen energetischen Qualität und einer realistisch umsetzbaren Kreislaufführung kombiniert wird. Eine belastbare ökologische Bewertung setzt dabei stets voraus, dass Vergleichsobjekte hinsichtlich Nutzungsdauer, funktionaler Anforderungen und Systemgrenzen konsistent betrachtet werden. Der tatsächliche Umweltnutzen containerbasierter Module hängt somit maßgeblich von der konkreten Ausführung, dem jeweiligen Modultyp und der realen Nutzung über den Lebenszyklus ab (vgl. Baltrocchi et al., 2026, S. 13–14).

3.2 Ökonomische Faktoren

Ökonomische Faktoren werden in dieser Arbeit als Größen verstanden, die die Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit modularer Container-Module im urbanen Wohnkontext bestimmen. Im Mittelpunkt stehen dabei die Realisierungsdauer, die Investitionskosten sowie die Betriebs- und Wartungskosten über den Lebenszyklus eines Gebäudes (vgl. Bertram et al., 2019, S. 5; Guaygua et al., 2024, S. 2; Kamali et al., 2022). Die ökonomische Perspektive grenzt sich damit bewusst von der ökologischen Betrachtung ab: Nicht Umweltkennzahlen stehen hier im Vordergrund, sondern die Frage, unter welchen Bedingungen sich Container-Module im Vergleich zu konventionellen, standortgebundenen Bauweisen organisatorisch effizient und wirtschaftlich tragfähig realisieren und betreiben lassen. Als zentrale Indikatoren werden daher die Bauzeit in Wochen oder Monaten, Investitionskosten in €/m² sowie Betriebskosten in €/m²a herangezogen. Eine belastbare wirtschaftliche Bewertung setzt dabei voraus, Investitions- und Betriebskosten getrennt zu betrachten und deren Wechselwirkungen im Lebenszyklus mitzudenken (vgl. Kamali et al., 2022).

Ein wesentlicher ökonomischer Ansatzpunkt modularer Systeme ist die potenzielle Verkürzung der Bauzeit durch Vorfertigung. Bei konventionellen Bauweisen erfolgen viele Arbeitsschritte sequenziell auf der Baustelle und sind damit in hohem Maße von Witterung, Personalverfügbarkeit und innerstädtischer Logistik abhängig. Bei modularen Konzepten können hingegen Produktionsprozesse im Werk und vorbereitende Maßnahmen auf der Baustelle parallel stattfinden (vgl. Bertram et al., 2019, S. 11). Während Fundamente, Erschließung und gegebenenfalls Tragstrukturen vor Ort hergestellt werden, werden die Module zeitgleich industriell gefertigt. Die Montagephase reduziert sich anschließend im Wesentlichen auf das Positionieren, Verbinden und Anschließen der Module sowie die Inbetriebnahme der technischen Anlagen. Diese zeitliche Verdichtung wirkt sich nicht nur auf die reine Bauzeit aus, sondern kann auch indirekte Kosten beeinflussen, etwa Baustellengemeinkosten, Geräte- und Gerüstmieten, Sicherheitsmaßnahmen oder wirtschaftliche Risiken durch Verzögerungen (vgl. Bertram et al., 2019, S. 14). Vergleichende Untersuchungen deuten darauf hin, dass modulare Bauweisen insbesondere bei Termin- und Ablaufvorteilen Stärken aufweisen, während Kostenvorteile gegenüber konventionellen Bauweisen nicht in jedem Fall gleichermaßen deutlich ausfallen (vgl. Wang et al., 2025). Gerade in verdichteten urbanen Lagen kann eine verkürzte Bauphase dennoch ökonomisch relevant sein, da Beeinträchtigungen für Umfeld und Infrastruktur zeitlich begrenzt bleiben.

Die Investitionskosten stellen einen weiteren Kernindikator dar und werden in der Regel auf die Wohnfläche bezogen. Bei Container-Modulen setzen sich diese Kosten aus mehreren Bestandteilen zusammen: der werkseitigen Herstellung von Modulstruktur, Ausbau und Haustechnik, Transport- und Kranleistungen, Montagearbeiten auf der Baustelle sowie standortbezogenen Leistungen wie Fundamentierung, Erschließung, Anschlussarbeiten und gegebenenfalls zusätzlichem Genehmigungs- oder Anpassungsaufwand. Potenzielle Kostenvorteile können sich durch Standardisierung, Serienfertigung und wiederholbare Produktionsprozesse ergeben, da diese zu stabileren Stückkosten und einer höheren Kalkulationssicherheit beitragen können (vgl. Bertram et al., 2019, S. 23). Allerdings sind diese Effekte stark von der Projektstruktur abhängig. Geringe Stückzahlen, hohe Individualisierungsgrade oder komplexe Sonderanforderungen können Skaleneffekte deutlich reduzieren (vgl. Qiang et al., 2023). Studien zu Kostentreibern modularer Bauweisen zeigen zudem, dass insbesondere frühe Planungs- und Entwurfsentscheidungen, Schnittstellenprobleme, logistische Anforderungen und mangelnde Standardisierung kostensteigernd wirken können (vgl. Lee & Kim, 2017). Ebenso beeinflussen projektspezifische Rahmenbedingungen wie Grundstückssituation, Anforderungen an Brand- und Schallschutz, architektonische Geometrie oder die Integration in bestehende Infrastrukturen die Schnittstellen- und Anpassungskosten erheblich.

Neben den Investitionskosten sind auch Betriebs- und Lebenszykluskosten zu berücksichtigen, da die wirtschaftliche Bewertung eines Wohngebäudes nicht mit dessen Fertigstellung endet. Zu den Betriebskosten zählen

insbesondere Energie- und Medienkosten, Wartungskosten der technischen Gebäudeausrüstung sowie Aufwendungen für Instandhaltung und Instandsetzung (vgl. Guaygua et al., 2024, S. 14). Eine lebenszyklusorientierte Betrachtung ist gerade bei modularen Wohnformen sinnvoll, da wirtschaftliche Vorteile nicht allein aus der Errichtung, sondern auch aus standardisierten Wartungsprozessen, planbaren Instandhaltungsintervallen und möglichen Wiederverwendungsstrategien resultieren können (vgl. Kamali et al., 2022). Durch den hohen Vorfertigungsgrad können technische Komponenten häufig standardisiert und systematisch dokumentiert werden, was Wartungsprozesse vereinfachen und planbarer machen kann. Gleichzeitig kann eine ausgeprägte Technikintegration, beispielsweise durch Smart-Living-Systeme, zusätzliche Kosten verursachen (vgl. Qiang et al., 2023). Dazu zählen Ausgaben für Sensorik, Steuerungstechnik, Software, regelmäßige Updates oder IT-Sicherheitsmaßnahmen. Wirtschaftlich relevant ist daher, ob der durch diese Systeme generierte Mehrwert die entstehenden Mehrkosten langfristig kompensieren kann, etwa durch geringere Ausfallzeiten, optimierte Verbrauchsdaten oder effizientere Wartungsintervalle. Diese Bewertung erfolgt im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Abwägung und nicht unter ökologischen Gesichtspunkten.

Ein spezifischer ökonomischer Aspekt modularer Container-Module ist zudem ihre potenzielle Versetzbarkeit. Wenn Module nach Ablauf einer Nutzung demontiert und an einem anderen Standort erneut eingesetzt werden können, verändert sich die wirtschaftliche Betrachtung von einem einmaligen Projekt hin zu einem mehrzyklischen Nutzungskonzept. In einem solchen Fall lassen sich Investitionskosten auf mehrere Einsatzphasen verteilen, was insbesondere bei temporären Wohnbedarfen wirtschaftliche Vorteile bieten kann (vgl. Guaygua et al., 2024). Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass Rückbau, Transport, Anpassung an neue Standorte sowie erneute Genehmigungsverfahren in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen bleiben. Andernfalls relativiert sich der potenzielle Vorteil deutlich. Versetzbarkeit stellt somit kein automatisches Wirtschaftlichkeitsmerkmal dar, sondern ein kontextabhängiges Potenzial, dessen tatsächliche Wirksamkeit von den jeweiligen Rahmenbedingungen abhängt.

Zusammenfassend wird die ökonomische Dimension modularer Container-Module in dieser Arbeit anhand von Bauzeit, Investitionskosten und Betriebskosten strukturiert betrachtet. Wirtschaftliche Potenziale ergeben sich vor allem durch die Parallelisierung von Prozessen, kurze Montagezeiten und Standardisierung bei ausreichender Stückzahl (vgl. Bertram et al., 2019, S. 5). Einschränkungen entstehen insbesondere dann, wenn hohe Individualisierung, komplexe Schnittstellen, zusätzliche technische Anforderungen oder standortspezifische Anpassungen die Kosten erhöhen. Die ökonomischen Indikatoren dienen damit als Bewertungsrahmen, um wirtschaftliche Potenziale, Grenzen und geeignete Einsatzbedingungen containerbasierter Module im urbanen Kontext nachvollziehbar einzuordnen und, soweit möglich, Bezüge zu konventionellen Bauweisen herzustellen.

3.3 Technologische Faktoren

Technologische Faktoren werden in dieser Arbeit als digital-technische Voraussetzungen verstanden, die containerbasierte Wohnmodule zu Smart-Living-fähigen Wohneinheiten machen und im Betrieb funktionale sowie betriebliche Potenziale eröffnen können. Im Fokus stehen Monitoring, Sensorik, IoT-Integration sowie Steuerungs- und Automationsfunktionen. Dabei ist zu unterscheiden: Energie- oder Kosteneinsparungen stellen nicht den technologischen Faktor selbst dar, sondern mögliche Ergebnisse eines funktionierenden digital unterstützten Gebäudebetriebs. Bewertet wird die technologische Dimension daher über zwei eng miteinander verknüpfte Aspekte: erstens die Monitoring-Abdeckung, also die Frage, welche relevanten Verbräuche und Zustände tatsächlich erfasst werden, und zweitens das potenzielle Einspar- und Optimierungspotenzial durch digitale Regelung im Vergleich zu einem Betrieb ohne entsprechende Smart-Funktionen (vgl. ISO 52120-1, 2022).

Monitoring bildet die Grundlage für einen datenbasierten Gebäudebetrieb. Entscheidend ist, welche Messpunkte vorhanden sind und wie differenziert Daten erhoben werden. Typischerweise betrifft dies Strom-, Wärme- und Wasserverbräuche – idealerweise getrennt nach Wohneinheit oder Nutzungsbereich – sowie ergänzende Parameter wie Raumtemperatur, Luftfeuchte, CO_2-Konzentration, Fensterkontakte oder Belegungsindikatoren. Je umfassender und zugleich praxisnäher die Datenerfassung, desto besser lassen sich Verbrauchsmuster erkennen, Fehlfunktionen identifizieren und betriebliche Entscheidungen ableiten (vgl. O'Grady et al., 2021).

In dieser Arbeit wird die Monitoring-Abdeckung daher als strukturierter Grad der Erfassbarkeit relevanter Messgrößen verstanden. Maßgeblich ist nicht allein die Existenz eines Dashboards, sondern ob die erfassten Daten im Betrieb tatsächlich auswertbar und für Eingriffe nutzbar sind.

Typische Smart-Living-Anwendungen im Wohnbereich lassen sich daran konkret illustrieren. Dazu zählen etwa die getrennte Erfassung von Strom-, Wärme- und Wasserverbräuchen, eine temperatur- oder belegungsabhängige Heizungsregelung, eine CO_2-gesteuerte Lüftung, die automatische Heizungsabsenkung bei geöffnetem Fenster oder die frühzeitige Erkennung technischer Auffälligkeiten anhand ungewöhnlicher Verbrauchsverläufe. Solche Anwendungen zeigen, dass technologische Faktoren nicht nur in abstrakten IT-Strukturen bestehen, sondern unmittelbar in den Alltag des Gebäudebetriebs eingreifen. Gerade im Wohnkontext ist daher entscheidend, ob die Systeme robust, verständlich und betrieblich sinnvoll integriert sind.

Technisch lässt sich Smart Living in containerbasierten Modulen als Kette aus Sensorik, Datenübertragung, Auswertung und Regelung beschreiben. Sensoren und Zähler erfassen Zustände und Verbräuche, Gateways oder vergleichbare Kommunikationsschnittstellen übermitteln die Daten an eine lokale oder cloudbasierte Auswertungsebene, und auf dieser Grundlage werden Informationen visualisiert oder automatische Regelbefehle an Aktoren übergeben. Eine typische Systemarchitektur umfasst damit Messpunkte, Kommunikationsinfrastruktur, Auswertungslogik, Bedienoberflächen für Nutzende oder Betreiber sowie – bei höherem Automatisierungsgrad – die direkte Ansteuerung technischer Anlagen wie Heizung, Lüftung oder Beleuchtung. Erst durch dieses Zusammenspiel entsteht ein operativ nutzbares Smart-Living-System (vgl. ISO 52120-1, 2022).

Für die technologische Bewertung ist zudem eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Automatisierungsgraden sinnvoll. Auf der ersten Stufe steht ein rein überwachender Betrieb, bei dem Daten lediglich erfasst und angezeigt werden. Auf einer zweiten Stufe unterstützen digitale Systeme betriebliche Entscheidungen, ohne selbst unmittelbar einzugreifen; Eingriffe erfolgen hier weiterhin durch Nutzende oder Betreiber. Eine dritte Stufe umfasst teilautomatisierte Regelungen, bei denen definierte Reaktionen – etwa Heizungsabsenkung, Lüftungsanpassung oder Lastverschiebung – automatisch auf bestimmte Messwerte oder Zustände folgen. Darüber hinaus sind stärker integrierte Systeme denkbar, bei denen mehrere technische Gewerke vernetzt zusammenwirken (vgl. ISO 52120-1, 2022). Für den Wohnbereich ist diese Differenzierung bedeutsam, weil nicht jede digitale Ausstattung automatisch einen hohen intelligenten Automatisierungsgrad bedeutet. Ein digitales Dashboard allein schafft noch keinen optimierten Betrieb, solange aus den Daten keine wirksamen Maßnahmen abgeleitet oder automatisiert umgesetzt werden.

Auf dieser Datengrundlage baut die intelligente Steuerung auf. Sie umfasst die aktive Beeinflussung von Energieverbrauch und Komfort durch automatisierte oder teilautomatisierte Regelstrategien. Typische Anwendungen sind die bedarfsorientierte Steuerung von Heizung und Lüftung, zeit- oder präsenzabhängige Beleuchtung sowie Optimierungen im Warmwasser- und Lastmanagement. Der technologische Mehrwert entsteht dadurch, dass Systeme nicht starr nach festen Zeitplänen arbeiten, sondern auf aktuelle Messwerte reagieren. Eine Heizungsregelung, die sich an realen Raumtemperaturen und Nutzungsprofilen orientiert, eine Lüftung, die auf gemessene Luftqualität reagiert, oder eine automatische Absenkung bei geöffnetem Fenster sind typische Beispiele (vgl. Qiang et al., 2023). Auch die frühzeitige Erkennung von Störungen – etwa durch ungewöhnliche Verbrauchsmuster oder auffällige Temperaturverläufe – zählt dazu, da sie Wartung planbarer macht und ineffiziente Betriebszustände schneller korrigiert werden können (vgl. Ekanayaka Gunasinghalge et al., 2025).

Modulare Container-Module bieten hierbei einen spezifischen Vorteil: Digitale Technologien können bereits im Werk standardisiert integriert werden. Sensorik, Leitungsführung, Netzwerkinfrastruktur und technische Komponenten lassen sich unter kontrollierten Bedingungen einbauen, prüfen und dokumentieren. Das kann die technische Qualität erhöhen, Schnittstellenprobleme reduzieren und die Inbetriebnahme vereinfachen. Gerade für wiederholbare Grundrisse und standardisierte Ausstattungen eröffnet dies Potenziale, weil technische Systeme nicht für jedes Projekt vollständig neu konzipiert werden müssen. Gleichzeitig entstehen jedoch neue Anforderungen. Systeme müssen interoperabel sein, damit Sensoren, Aktoren und gebäudetechnische Anlagen zuverlässig zusammenspielen (vgl. ISO 52120-1, 2022). Ebenso sind eine stabile IT-Infrastruktur, geeignete Kommunikationswege, gegebenenfalls Gateways oder Cloud-Anbindungen sowie die Einhaltung von Datenschutz- und IT-Sicherheitsanforderungen notwendig.

Darüber hinaus hängt der tatsächliche Nutzen technischer Systeme im Wohnkontext nicht allein von ihrer Installation ab, sondern wesentlich auch vom realen Betrieb. Nutzerverhalten, Akzeptanz und Wartungsaufwand beeinflussen maßgeblich, ob Smart-Living-Systeme ihren potenziellen Mehrwert tatsächlich entfalten. Werden Systeme nicht verstanden, als störend empfunden oder im Alltag umgangen, kann ihr Nutzen erheblich sinken. Gleiches gilt, wenn Sensorik ausfällt, Daten nicht ausgewertet werden oder Regelstrategien im laufenden Betrieb nicht nachjustiert werden. Technologische Lösungen sind daher nur dann langfristig wirksam, wenn sie nicht nur technisch funktionieren, sondern auch benutzbar, wartbar und organisatorisch in den Gebäudebetrieb eingebunden sind.

Als Ergebnisindikator wird in dieser Arbeit das potenzielle Einsparpotenzial durch digitale Regelung herangezogen. Dieses wird als prozentuale Reduktion oder in kWh/m²a im Vergleich zu einem Referenzbetrieb ohne Smart-Funktionen beschrieben (vgl. ISO 52120-1, 2022). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Einsparungen nicht automatisch entstehen. Sie hängen davon ab, ob Monitoring Daten tatsächlich ausgewertet, Regelstrategien sinnvoll eingestellt, Systeme instandgehalten und von den Nutzenden akzeptiert werden. In der technologischen Bewertung wird daher untersucht, ob containerbasierte Module die notwendigen Voraussetzungen für einen optimierten Betrieb bieten: ausreichende Messbarkeit, sinnvolle Steuerbarkeit, geeignete Systemintegration sowie eine sichere und wartbare technische Architektur. Auf dieser Grundlage lassen sich technologische Potenziale für den realen Betrieb plausibel einordnen (vgl. Zangheri et al., 2019, S. 19–21).

Zusammenfassend zeigt sich, dass die technologische Dimension containerbasierter Module vor allem dann relevant wird, wenn digitale Systeme nicht nur vorhanden, sondern funktional in Betrieb und Nutzung eingebunden sind. Potenziale ergeben sich insbesondere durch werkseitige Vorintegration, standardisierte technische Ausstattung und die Möglichkeit, Monitoring und Steuerung frühzeitig in das Gebäudekonzept einzubinden. Gleichzeitig ist der technologische Nutzen an Bedingungen geknüpft: erforderlich sind geeignete Systemarchitekturen, ein angemessener Automatisierungsgrad, Interoperabilität, Wartbarkeit sowie Akzeptanz im praktischen Betrieb. Smart Living ist damit nicht als bloße Zusatzausstattung zu verstehen, sondern als qualitätsabhängiger Bestandteil eines funktionierenden Gebäudebetriebs.

4. Ergebnisse und Praxisszenarien

4.1 Nachverdichtung

Die Nachverdichtung stellt ein besonders relevantes Anwendungsszenario für modulare Container-Module im urbanen Wohnungsbau dar. Ihr Ziel ist es, innerhalb bestehender Stadtstrukturen zusätzlichen Wohnraum zu schaffen, ohne neue Flächen am Stadtrand zu versiegeln. Typische Maßnahmen sind das Schließen von Baulücken, die Ergänzung von Hof- oder Randbereichen sowie Dachaufstockungen auf vorhandenen Gebäuden. Solche Standorte sind jedoch meist durch begrenzten Platz, enge Nachbarbebauung, schwierige Baustellenlogistik und erhöhte Anforderungen an Statik, Lärm- und Immissionsschutz geprägt. Vor diesem Hintergrund lässt sich auf Basis, der in Kapitel 3 diskutierten Faktoren ableiten, dass containerbasierte Module für Nachverdichtungsmaßnahmen unter bestimmten Bedingungen ein besonders geeignetes Anwendungsszenario darstellen können.

Ein wesentliches Potenzial liegt in der möglichen Verkürzung der Bauzeit. Wie die ökonomische Analyse gezeigt hat, erlaubt der hohe Vorfertigungsgrad eine Parallelisierung von Produktions- und Baustellenprozessen. Während vor Ort Fundamente, Erschließung oder vorbereitende Tragwerksmaßnahmen ausgeführt werden, können die Module zeitgleich im Werk gefertigt werden. Gerade bei Nachverdichtungsprojekten im Bestand erscheint dies besonders relevant, da sich die eigentliche Montagephase verkürzen kann. Daraus können sich geringere Störungen für Anwohnende und bestehende Nutzungen ergeben, etwa durch weniger Baustellenverkehr, geringere Lärm- und Staubbelastung sowie kürzere Sperrungen oder Nutzungseinschränkungen. Im dicht bebauten urbanen Umfeld ist dieser Aspekt nicht nur organisatorisch, sondern auch wirtschaftlich und sozial von Bedeutung.

Auch in statischer Hinsicht können containerbasierte Module für Dachaufstockungen vorteilhaft sein. Viele Bestandsgebäude verfügen nur über begrenzte Tragreserven, sodass zusätzliche Lasten möglichst geringgehalten werden müssen. Besonders geeignet erscheinen daher vorgefertigte Wohnmodule in optimierter Rahmen- oder Leichtbauweise, nicht schwere, umgenutzte Frachtcontainer. Durch eine angepasste Konstruktion kann das

Eigengewicht im Vergleich zu massiven konventionellen Lösungen reduziert werden. Dies kann die Eignung für Dachaufstockungen verbessern und den Bedarf an Verstärkungsmaßnahmen am Bestand verringern. Allerdings ist die statische Eignung stets objektspezifisch zu prüfen. Der mögliche Vorteil liegt daher nicht in einer pauschalen Leichtigkeit der Bauweise, sondern in der konstruktiven Anpassungsfähigkeit der Module an die Tragfähigkeit des Bestands.

Auch ökologisch kann die Nachverdichtung mit Container-Modulen Potenziale aufweisen. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, entstehen ökologische Vorteile jedoch nicht automatisch, sondern hängen von Materialwahl, energetischer Qualität und tatsächlicher Kreislauffähigkeit ab. Positiv ist vor allem, dass durch die Nutzung bereits erschlossener Standorte zusätzliche Flächeninanspruchnahme vermieden werden kann. Werden Container-Module zudem mit energieeffizienten Gebäudehüllen, luftdichten Anschlüssen und geeigneter Haustechnik ausgeführt, können sie zu einer nachhaltigeren Quartiersentwicklung beitragen. Hinzu kommt, dass die industrielle Vorfertigung im Vergleich zur konventionellen Baustellenfertigung Potenziale zur Reduktion von Materialverlusten, Baustellenabfällen und baubedingten Umweltbelastungen eröffnet. Gerade im Kontext der Nachverdichtung ist dies relevant, da Umweltwirkungen hier nicht nur über die Lebenszyklusbilanz, sondern auch über die unmittelbare Belastung des städtischen Umfelds wahrgenommen werden.

Die technologische Dimension kann diese Eignung zusätzlich unterstützen. In verdichteten Quartieren, in denen Energieeffizienz, Ressourcentransparenz und Betriebsoptimierung zunehmend an Bedeutung gewinnen, können vorintegrierte Smart-Living-Technologien einen funktionalen Mehrwert bieten. Wie in Kapitel 3.3 dargestellt, liegt ihr Nutzen nicht allein in der Installation digitaler Systeme, sondern in der gezielten Nutzung von Monitoring- und Verbrauchsdaten zur Optimierung des Betriebs. Für Nachverdichtungsprojekte bedeutet dies, dass modulare Wohneinheiten bereits im Werk mit Sensorik, Zählinfrastruktur und Steuerungstechnik ausgestattet werden können. Energieverbräuche, Raumklima oder technische Auffälligkeiten lassen sich dadurch transparenter erfassen und gegebenenfalls bedarfsgerecht steuern. Gerade bei kleineren Wohneinheiten oder Aufstockungen im Bestand kann dies zu einem effizienteren und besser nachvollziehbaren Gebäudebetrieb beitragen.

Insgesamt spricht die vorangegangene Analyse dafür, dass containerbasierte Module für Nachverdichtungsmaßnahmen ein plausibles und unter geeigneten Bedingungen besonders geeignetes Anwendungsszenario darstellen. Die potenziellen Stärken liegen vor allem in der verkürzbaren Bauzeit, dem hohen Vorfertigungsgrad, der konstruktiven Anpassungsfähigkeit bei Dachaufstockungen sowie in der Möglichkeit, energieeffiziente und technologisch vorintegrierte Lösungen umzusetzen. Gleichzeitig ist ihre Eignung an klare Voraussetzungen geknüpft: erforderlich sind eine angemessene Standardisierung, eine präzise Planung der Schnittstellen zum Bestand sowie eine objektspezifische Prüfung von Statik, Bauphysik und Genehmigungsfähigkeit. Container-Module sind damit nicht in jedem Fall die optimale Lösung, weisen jedoch im Bereich der urbanen Nachverdichtung ein besonders hohes Anwendungspotenzial auf.

4.2 Temporäre Nutzung

Die temporäre Nutzung stellt ein weiteres zentrales Anwendungsszenario modularer Container-Module im urbanen Wohnkontext dar. Sie wird insbesondere dort relevant, wo Wohnraumbedarf kurzfristig entsteht, zeitlich begrenzt ist oder stark schwankt. Typische Beispiele sind Studierendenwohnheime, Unterkünfte für Auszubildende, Übergangswohnen während Sanierungs- oder Neubauphasen sowie temporäre Angebote in wachsenden Stadtquartieren. Charakteristisch sind wechselnde Bedarfe, begrenzte Nutzungszeiträume und ein hoher Zeit- und Kostendruck. Vor diesem Hintergrund lässt sich auf Basis, der in Kapitel 3 diskutierten Faktoren ableiten, dass containerbasierte Module für temporäre Wohnformen unter bestimmten Bedingungen ein besonders geeignetes Anwendungsszenario darstellen können.

Ein wesentliches Potenzial liegt in der kurzen Realisierungszeit. Temporärer Wohnbedarf entsteht häufig kurzfristig und lässt sich nur begrenzt langfristig planen. Konventionelle Bauweisen stoßen hier schnell an Grenzen, da Planung und Umsetzung meist auf dauerhafte Nutzungskonzepte ausgerichtet sind und entsprechend lange Vorlaufzeiten erfordern. Modulare Container-Module ermöglichen hingegen durch ihren hohen Vorfertigungsgrad eine Parallelisierung von Produktions- und Baustellenprozessen. Während vor Ort die notwendigen Vorbereitungen erfolgen, können die Module zeitgleich im Werk gefertigt werden. Dadurch kann sich die Bauzeit verkürzen. Für

Wohnformen wie Studierendenheime ist das besonders relevant, da Wohnraum häufig zu einem festen Termin, etwa zum Semesterbeginn, bereitstehen muss. Die verkürzte Montagezeit kann damit nicht nur die organisatorische Umsetzbarkeit verbessern, sondern auch die Fähigkeit erhöhen, auf kurzfristige Nachfragespitzen flexibler zu reagieren.

Auch ökonomisch erscheint die temporäre Nutzung als passendes Einsatzfeld. Wie in Kapitel 3.2 dargestellt, entstehen wirtschaftliche Potenziale vor allem dann, wenn Standardisierung, Serienfertigung und verkürzte Bauzeiten wirksam werden. Bei temporären Nutzungen ist die Zahlungsbereitschaft für stark individualisierte oder dauerhaft angelegte Lösungen häufig begrenzt. Im Vordergrund stehen funktionale, schnell verfügbare und kalkulierbare Wohnangebote. Container-Module können hier unter geeigneten Rahmenbedingungen Vorteile bieten, da sie als standardisierte Einheiten mit wiederholbaren Grundrissen und vorintegrierter Technik umgesetzt werden können. Investitionskosten lassen sich dadurch mitunter reduzieren oder zumindest verlässlicher kalkulieren. Gleichzeitig ergeben sich wirtschaftliche Vorteile nicht automatisch. Sie hängen von Stückzahl, Standardisierungsgrad, Transportaufwand und den jeweiligen Standortanforderungen ab. Im temporären Kontext sind diese Voraussetzungen jedoch häufig eher gegeben als bei langfristigen, individuell geplanten Wohnprojekten.

Ein entscheidender Aspekt ist zudem die potenzielle Versetzbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Module. Während konventionelle Gebäude in der Regel dauerhaft an einen Standort gebunden sind, können modulare Container-Systeme so konzipiert werden, dass sie nach Ablauf einer Nutzungsphase demontiert, transportiert und andernorts erneut eingesetzt werden. Damit verschiebt sich die ökonomische und ökologische Logik des Bauens: Investitionskosten beziehen sich nicht mehr zwingend auf einen einmaligen Standort oder Nutzungszyklus, sondern können auf mehrere Einsatzphasen verteilt werden. Auch Herstellungsaufwände und graue Emissionen lassen sich rechnerisch über mehrere Nutzungsjahre hinweg betrachten. Wie in Kapitel 3.1 gezeigt wurde, ist dieses Potenzial jedoch an klare Voraussetzungen gebunden: erforderlich sind robuste Konstruktionen, standardisierte Schnittstellen, lösbare Verbindungen sowie geeignete rechtliche und organisatorische Rahmenbedingungen. Nur wenn diese tatsächlich gegeben sind, kann sich für temporäre Wohnformen ein relevanter Mehrwert gegenüber konventionellen Bauweisen ergeben.

Die technologische Dimension kann diese Eignung zusätzlich unterstützen. Temporäre Wohnanlagen müssen häufig effizient organisiert und mit möglichst geringem Betriebsaufwand betrieben werden. Vorgefertigte Smart-Living-Komponenten können hier einen praktischen Nutzen bieten. Wie in Kapitel 3.3 erläutert, liegt der Mehrwert nicht allein in der digitalen Ausstattung, sondern in der sinnvollen Integration von Monitoring, Sensorik und Steuerung. Gerade bei wechselnder Belegung können standardisiert vorinstallierte Systeme Vorteile bringen, etwa durch transparente Erfassung von Energie- und Wasserverbräuchen, bedarfsgerechte Heizungs- und Lüftungssteuerung oder die frühzeitige Erkennung technischer Störungen. Dies kann den Betrieb vereinfachen und Verbrauch sowie Wartungsaufwand reduzieren. Für Einrichtungen mit häufigem Nutzerwechsel ist ein robuster und möglichst unkomplizierter Gebäudebetrieb von besonderer Bedeutung.

Auch ökologisch ist das Szenario der temporären Nutzung relevant. Ein zeitlich begrenzter Wohnbedarf sollte möglichst nicht durch baulich und materiell aufwendige Lösungen gedeckt werden, die nach kurzer Zeit wieder rückgebaut werden müssen. Container-Module können dann ökologisch sinnvoll sein, wenn ihre Nutzung Teil eines mehrzyklischen Konzepts ist und nicht zu einem einmaligen Ressourcenverbrauch führt. Die ökologische Stärke liegt daher weniger in der Ersterrichtung als in der Möglichkeit der Wiederverwendung. Zusätzlich können der hohe Vorfertigungsgrad und die verkürzte Baustellenphase dazu beitragen, baubedingte Belastungen im urbanen Umfeld zu reduzieren. Allerdings relativieren sich diese Potenziale, wenn energetische Qualität, Materialwahl oder tatsächliche Weiterverwendung nicht konsequent berücksichtigt werden.

Ergänzend sind im Kontext temporärer Wohnformen auch soziale und nutzungsbezogene Aspekte zu berücksichtigen. Funktionale und schnell realisierbare Wohnangebote sind nicht automatisch mit guter Wohnqualität gleichzusetzen. Entscheidend ist vielmehr, ob Belichtung, Raumklima, Schallschutz, Privatsphäre und alltagspraktische Nutzbarkeit in einem angemessenen Verhältnis zur geplanten Nutzungsdauer stehen. Auch die Akzeptanz durch Nutzende und Umfeld spielt eine Rolle, da containerbasierte Wohnformen mitunter als Provisorium wahrgenommen oder stigmatisiert werden können. Gerade bei Studierenden- oder Übergangswohnen ist daher zu

prüfen, ob der bauliche und soziale Standard nicht nur kurzfristig funktional, sondern auch für die tatsächliche Nutzungsrealität angemessen ist.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass temporäre Wohnformen in der Praxis häufig länger bestehen bleiben als ursprünglich vorgesehen. Eine als Übergangslösung geplante Anlage kann sich faktisch verstetigen, wenn Wohnraummangel anhält oder Ersatzlösungen ausbleiben. In einem solchen Fall steigen die Anforderungen an Wohnqualität, Dauerhaftigkeit, Instandhaltung und soziale Akzeptanz deutlich. Was für eine befristete Nutzung angemessen erscheint, muss daher nicht automatisch auch für einen langfristigeren Betrieb geeignet sein. Die Bewertung temporärer Container-Module sollte deshalb nicht nur auf die geplante, sondern auch auf eine mögliche verlängerte Nutzungsperspektive bezogen werden.

Insgesamt spricht die vorangegangene Analyse dafür, dass containerbasierte Module für temporäre Nutzungen wie Studierendenwohnheime oder Übergangswohnen ein plausibles und unter geeigneten Bedingungen besonders geeignetes Anwendungsszenario darstellen. Die potenziellen Stärken liegen vor allem in der kurzen Realisierungszeit, der Standardisierbarkeit, der möglichen Wiederverwendbarkeit sowie der technischen Vorintegration. Gleichzeitig ist ihre Eignung an klare Voraussetzungen geknüpft: erforderlich sind wirtschaftlich tragfähige Rahmenbedingungen, eine tatsächliche Wiederverwendungslogik, ein funktionaler und sozial angemessener Wohnstandard sowie die Berücksichtigung des Risikos, dass temporäre Lösungen länger bestehen bleiben als ursprünglich geplant. Container-Module sind damit auch im temporären Kontext keine pauschal überlegene Lösung, können aber unter geeigneten Bedingungen einen sinnvollen Beitrag zur flexiblen urbanen Wohnraumbereitstellung leisten.

5. Kritische Würdigung und Diskussion

Die vorangegangene Analyse deutet darauf hin, dass modulare Container-Module im urbanen Wohnkontext relevante Potenziale besitzen, insbesondere bei Nachverdichtung und temporären Nutzungen. Ihre Stärken liegen vor allem im hohen Vorfertigungsgrad, in der verkürzbaren Montagezeit sowie in der Möglichkeit, technische Systeme bereits werkseitig zu integrieren. Daraus lässt sich jedoch keine grundsätzliche Überlegenheit gegenüber konventionellen Bauweisen ableiten. Die Eignung modularer Container-Module hängt vielmehr stark von den jeweiligen baulichen, ökonomischen, technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen ab.

Ökonomisch betrachtet erscheint vor allem die verkürzte Realisierungszeit als ein zentrales Potenzial. Gerade in verdichteten Städten können kürzere Bauphasen dazu beitragen, Störungen, logistische Herausforderungen und zeitbedingte Zusatzkosten zu reduzieren. Eine verkürzte Bauzeit bedeutet jedoch nicht automatisch geringere Gesamtkosten. Wirtschaftliche Vorteile ergeben sich insbesondere dann, wenn Standardisierung, Wiederholbarkeit und geringe Anpassungsbedarfe gegeben sind. Hohe Individualisierung, komplexe Standortbedingungen oder zusätzliche regulatorische Anforderungen können diese Effekte deutlich relativieren. Die ökonomische Attraktivität containerbasierter Module ist daher nicht pauschal gegeben, sondern kontextabhängig.

Auch ökologisch fällt die Bewertung differenziert aus. Durch industrielle Vorfertigung, reduzierten Materialverschnitt und potenzielle Wiederverwendung können containerbasierte Module grundsätzlich ökologische Chancen eröffnen, insbesondere dann, wenn sie mehrfach genutzt oder an andere Standorte versetzt werden. Eine positive Umweltbilanz ist jedoch keineswegs selbstverständlich. Sie hängt maßgeblich von der Materialwahl, der energetischen Qualität, der konkreten konstruktiven Ausführung und der tatsächlichen Kreislaufführung ab. Gerade stahlbasierte Konstruktionen können in der Herstellung hohe Emissionen verursachen, wenn diese nicht durch lange Nutzungsdauern oder konsequente Wiederverwendung kompensiert werden.

In technologischer Hinsicht eröffnen modulare Systeme ebenfalls Potenziale, da Monitoring-, Sensor- und Steuerungstechnik frühzeitig integriert werden können. Dadurch lassen sich Transparenz, Regelbarkeit und ein effizienterer Gebäudebetrieb grundsätzlich unterstützen. Der tatsächliche Mehrwert digitaler Systeme entsteht jedoch nur dann, wenn sie interoperabel, wartungsfähig und im Alltag sinnvoll nutzbar sind. Zudem erhöhen Smart-Living-Lösungen die Anforderungen an Datenschutz, IT-Sicherheit und langfristige Betriebsorganisation. Technologische Ausstattung allein garantiert daher noch keinen optimierten Betrieb.

Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass die Bewertung containerbasierter Wohnformen nicht allein an ökonomischen, ökologischen und technologischen Kriterien festgemacht werden kann. Auch soziale Aspekte spielen eine wichtige Rolle. Dazu zählen insbesondere Wohnkomfort, Raumklima, Schallschutz, Privatsphäre und die alltagspraktische Nutzbarkeit der Wohnräume. Ebenso relevant ist die gesellschaftliche Akzeptanz solcher Wohnformen. Containerbasierte Module können in der öffentlichen Wahrnehmung als provisorisch, minderwertig oder stigmatisierend eingeordnet werden, insbesondere wenn sie mit Notunterkünften oder reinen Übergangslösungen assoziiert werden. Für eine tragfähige Bewertung ist daher entscheidend, ob containerbasierte Wohnformen nicht nur funktional und effizient, sondern auch sozial angemessen und dauerhaft akzeptabel gestaltet werden können.

Zugleich sind die methodischen Grenzen des Beitrags zu beachten. Die vorliegenden Schlussfolgerungen beruhen auf einer literaturgestützten und analytisch-konzeptionellen Auseinandersetzung mit dem Thema. Es handelt sich nicht um eine eigene empirische Untersuchung mit standardisierten Vergleichsdaten, Fallstudienauswertungen oder gemessenen Leistungswerten realisierter Projekte. Aussagen zu Bauzeit, Kosten, Umweltwirkungen und technologischem Nutzen sind daher als fachlich begründete Einordnung und nicht als empirisch überprüfter Nachweis zu verstehen. Insbesondere direkte Vergleiche mit konventionellen Bauweisen bleiben dadurch von den in der Literatur verfügbaren Rahmenbedingungen, Systemgrenzen und Projekttypen abhängig.

Insgesamt wird deutlich, dass modulare Container-Module besonders dort als sinnvoll erscheinen, wo Zeitdruck, Flächenknappheit und flexible Nutzungsanforderungen zusammentreffen. Potenziale zeigen sich vor allem bei Nachverdichtungsprojekten und temporären Wohnformen. Grenzen werden dort sichtbar, wo hohe Individualisierung, komplexe technische Anforderungen, ungünstige Standortbedingungen oder unzureichende soziale Akzeptanz vorliegen. Container-Module sind damit keine universelle Lösung für den urbanen Wohnraummangel, stellen jedoch unter bestimmten Bedingungen einen fachlich gut begründbaren und anpassungsfähigen Ansatz dar.

6. Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, containerbasierte modulare Wohnformen als mögliche Wohnlösung für verdichtete urbane Räume unter ökologischen, ökonomischen und technologischen Gesichtspunkten zu analysieren. Im Mittelpunkt stand die Frage, welche Potenziale und Grenzen diese Bauweise im Vergleich zu konventionellen, standortgebundenen Bauformen im urbanen Kontext aufweist. Die Literatur und die konzeptionelle Analyse deuten darauf hin, dass containerbasierte Module in den betrachteten Dimensionen relevante Potenziale besitzen, deren Wirksamkeit jedoch stark von den jeweiligen Einsatzbedingungen abhängt.

Besonders plausibel erscheinen diese Potenziale bei Nachverdichtungsprojekten und temporären Nutzungen. Im urbanen Bestand können containerbasierte Module aufgrund ihres hohen Vorfertigungsgrads und der verkürzbaren Montagezeit dazu beitragen, bauliche Eingriffe, Störungen und logistische Belastungen zu verringern. Bei temporären Wohnformen kommt hinzu, dass Module grundsätzlich versetzbar und wiederverwendbar konzipiert werden können. Damit erscheinen sie vor allem dort geeignet, wo Zeitdruck, Flächenknappheit und flexible Bedarfe zusammentreffen.

Gleichzeitig wird deutlich, dass diese Bauweise nicht automatisch ökologisch, ökonomisch oder technologisch überlegen ist. Potenziale durch kurze Bauzeiten und Standardisierung können durch hohe Individualisierung, komplexe Schnittstellen oder zusätzliche Anforderungen relativiert werden. Auch eine positive ökologische Bilanz erscheint nur dann plausibel, wenn Materialwahl, energetische Qualität und tatsächliche Wiederverwendung konsequent aufeinander abgestimmt sind. Im technologischen Bereich zeigt sich zudem, dass Smart-Living-Funktionen nur dann einen belastbaren Mehrwert entfalten können, wenn Monitoring, Steuerung, Interoperabilität und Wartbarkeit im späteren Betrieb zuverlässig gewährleistet sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Literatur und die analytisch-konzeptionelle Betrachtung auf kontextabhängige Potenziale containerbasierter Module im urbanen Wohnungsbau hinweisen. Diese betreffen insbesondere die Realisierungszeit, die funktionale Flexibilität und die Möglichkeit technischer Vorintegration. Solche Potenziale treten jedoch vor allem in spezifischen Anwendungsszenarien auf und setzen klare planerische, konstruktive und betriebliche Voraussetzungen voraus. Container-Module stellen damit keine allgemeingültige

Lösung für den urbanen Wohnraummangel dar, können unter geeigneten Rahmenbedingungen jedoch einen sinnvollen Beitrag zu einer anpassungsfähigen und nachhaltigeren Wohnraumbereitstellung leisten.

Für weiterführende Untersuchungen erscheint es sinnvoll, die hier entwickelten Überlegungen durch konkrete Fallstudien und Vergleichsdaten realisierter Projekte zu vertiefen. Insbesondere fundierte Lebenszyklusanalysen, standardisierte Kostenvergleiche sowie empirische Daten zum tatsächlichen Energieverbrauch und zum praktischen Nutzen von Monitoring-Systemen könnten dazu beitragen, die Potenziale containerbasierter Module künftig präziser und belastbarer zu bewerten.

Literaturverzeichnis

Algeco. (2025). Gestapelte Containerwohnungen. https://www.algeco.de/index.php?rex_media_type=content_medium&rex_media_file=apart-ausstattung04.jpg

Baltrocchi, A. P. D., Shafique, M., & Torretta, V. (2026). A Systematic Review on Life Cycle Assessment of Prefabricated Buildings. Sustainable Horizons, 17, 100168. https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100168

Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G., & Woetzel, J. (2019). Modular construction: From projects to products. Capital Projects.

BigBox Berlin. (2018). Produktion Containermodul. https://bigboxberlin.de/wp-content/uploads/2018/07/bigboxberlin-container-freie-universitaet-4.jpg

Ekanayaka Gunasinghalge, L. U. G., Alazab, A., & Talukder, Md. A. (2025). Artificial intelligence for energy optimization in smart buildings: A systematic review and meta-analysis. Energy Informatics, 8(1), 135. https://doi.org/10.1186/s42162-025-00592-8

Guaygua, B., Sánchez-Garrido, A. J., & Yepes, V. (2024). Life cycle assessment of seismic resistant prefabricated modular buildings. Heliyon, 10(20), e39458. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39458

ISO 52120-1:2021. (2022). ISO. https://www.iso.org/standard/65883.html

Kamali, M., & Hewage, K. (2016). Life cycle performance of modular buildings: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 1171–1183. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031

Kamali, M., Hewage, K., & Sadiq, R. (2022). Economic sustainability benchmarking of modular homes: A life cycle thinking approach. Journal of Cleaner Production, 348, 131290. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131290

Lee, J.-S., & Kim, Y.-S. (2017). Analysis of cost-increasing risk factors in modular construction in Korea using FMEA. KSCE Journal of Civil Engineering, 21(6), 1999–2010. https://doi.org/10.1007/s12205-016-0194-1

Licdn. (2026). Beispiel IoT Dashboard. https://media.licdn.com/dms/image/v2/D5612AQFPBVmgAPjgAg/article-cover_image-shrink_720_1280/B56ZdDpd_LGQAM-/0/1749186640387?e=2147483647&v=beta&t=PoUX_QfhQsTJjZRfJzOahRbA2ckMKFvsT2sNa2_EclA

O'Grady, T., Chong, H.-Y., & Morrison, G. M. (2021). A systematic review and meta-analysis of building automation systems. Building and Environment, 195, 107770. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107770

O'Hegarty, R., McCarthy, A., O'Hagan, J., Thanapornpakornsin, T., Raffoul, S., & Kinnane, O. (2025). Understanding the embodied carbon credentials of modern methods of construction. Buildings & Cities, 6(1). https://doi.org/10.5334/bc.515

Qiang, G., Tang, S., Hao, J., Di Sarno, L., Wu, G., & Ren, S. (2023). Building automation systems for energy and comfort management in green buildings: A critical review and future directions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 179, 113301. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113301

Quale, J., Eckelman, M. J., Williams, K. W., Sloditskie, G., & Zimmerman, J. B. (2012). Construction Matters: Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States. Journal of Industrial Ecology, 16(2), 243–253. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00424.x

Wang, Y., Lam, S.-K., Wu, Z., Gong, L., Li, H., & Jiang, M. (2025). Does the Modular Construction Project Outperform the Traditional One? A Comparative Life Cycle Analysis Study in Hong Kong. Buildings, 15(16). https://doi.org/10.3390/buildings15162811

Zangheri, P., Serrenho, T., & Bertoldi, P. (2019). Energy Savings from Feedback Systems: A Meta-Studies' Review. Energies, 12(19). https://doi.org/10.3390/en12193788