Mieszana rzeczywistość w laboratorium metrologii – koncepcja wdrożenia HoloLens 2

Klaudia Tomaszewska

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: k.tomaszewska@pb.edu.pl

DOI: 10.65731/az-2026-0049

Streszczenie

Laboratoria pomiarowe w uczelniach technicznych stanowią kluczowe środowisko kształtowania kompetencji metrologicznych przyszłych inżynierów. Instrukcje papierowe na stanowiskach laboratoryjnych, mimo wieloletniej tradycji, nie odzwierciedlają standardów dokumentacji technicznej, z którymi absolwenci uczelni technicznych spotykają się w przemyśle. Technologie mieszanej rzeczywistości, a w szczególności platform Microsoft HoloLens 2 z aplikacją Dynamics 365 Guides, umożliwiają tworzenie holograficznych instrukcji bez znajomości programowania, bezpośrednio przez prowadzącego zajęcia. Celem artykułu jest opracowanie koncepcji wdrożenia stanowiska dydaktycznego w laboratorium pomiarowym uczelni technicznej z wykorzystaniem infrastruktury HoloLens 2 i Dynamics 365 Guides. Artykuł ma charakter przeglądowo-koncepcyjny; na podstawie przeglądu literatury 45 publikacji z baz Scopus i Web of Science (2015-2026) oraz analizy możliwości platformy zaproponowano scenariusze holograficznych przewodników dla trzech procedur pomiarowych (pomiar grubości metodą ultradźwiękową, pomiar gwintu metodą trójwałeczkową, obsługa profilografometru). Omówione zostały zalety, ograniczenia propozycje modernizacji stanowisk laboratoryjnych. Artykuł wskazuje, że technologia MR dostępna już na wydziale może podnieść jakość kształcenia metrologicznego bez wymiany sprzętu pomiarowego.

Słowa kluczowe

mieszana rzeczywistość, HoloLens 2, Microsoft Dynamics 365 Guides, cyfrowe instrukcje, laboratorium pomiarowe

Wstęp

Współczesne laboratoria metrologii w uczelniach wyższych funkcjonują w warunkach rosnącej rozbieżności między klasycznym wyposażeniem dydaktycznym, a technologicznym środowiskiem pracy, do którego trafiają absolwenci. Studenci uczą się posługiwania przyrządami, interpretacji wyników i szacowania niepewności pomiarowych, są to umiejętności, których nie zastąpi żaden kurs teoretyczny. Jednocześnie sposób prowadzenia tych zajęć w większości uczelni technicznych od dekad pozostaje niezmieniony; obejmuje papierową instrukcję stanowiskową, wykład wstępny prowadzącego oraz samodzielne wykonanie pomiarów przez studentów.

Zmiana sposobu dokumentowania i przekazywania wiedzy procesowej to jeden z wyraźniejszych trendów obserwowanych w przedsiębiorstwach produkcyjnych ostatniej dekady. Technologie rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości znalazły zastosowanie również w branży lotniczej, motoryzacyjnej czy elektronicznej, jako narzędzia instruktażu stanowiskowego, asystencji przy kontroli jakości czy wsparcia operatorów na liniach montażowych. Albers i in. [2023] w przeglądzie skoncentrowanym na użytkowniku zidentyfikowali inspekcję jakości, wspomaganie montażu i zdalną asystencję jako trzy główne obszary zastosowań AR/MR w środowiskach przemysłowych, a liczba publikacji naukowych w tym obszarze istotnie wzrosła po roku 2019. Kolla i in. [2023] charakteryzują MR jako technologię integrującą się ze wszystkimi poziomami systemów produkcyjnych Przemysłu 4.0 (od stanowisk operatorskich po systemy zarządzania produkcją). Treinen i Kolla [2024] potwierdzają aktualność tego trendu, wskazując, że AR jest stosowana w kontroli jakości, montażu i zdalnej asystencji jako pełnowartościowy element cyfrowej dokumentacji stanowiskowej.

Rosnące wymagania pracodawców wobec kompetencji cyfrowych absolwentów tworzą presję na modernizację dydaktyki laboratoryjnej. Absolwent kierunków inżynierskich trafia coraz częściej do środowisk produkcyjnych, w których holograficzne instrukcje nie są już ciekawostką, lecz elementem codziennej pracy. Jedną z dróg dostosowania laboratorium do tych realiów, bez konieczności wymiany kosztownego wyposażenia pomiarowego, jest wdrożenie platformy Microsoft HoloLens 2 z Dynamics 365 Guides, którą dysponuje wydział.

Celem pracy jest opracowanie koncepcji wdrożenia infrastruktury MR w istniejącym laboratorium pomiarowym. Artykuł podejmuje cztery kwestie badawcze. Pierwszą z nich jest przegląd tematyczny wykorzystania technologii immersyjnych w kontroli jakości i edukacji. Kolejna obejmuje ocenę potencjału dydaktycznego platformy Dynamics 365 Guides w laboratorium metrologii. Identyfikacja procedur

pomiarowych zyskujących dzięki implementacji holograficznych instrukcji. Ostatnia obejmuje analizę wykonalności, ograniczeń i perspektywy wdrożeniowe.

Artykuł ma charakter przeglądowo-koncepcyjny i może stanowić podstawę dla planowanej modernizacji laboratorium.

W kontekście dydaktyki metrologii szczególne znaczenie ma prawidłowe zrozumienie procedury pomiarowej, źródeł błędów oraz interpretacji wyników pomiarów zgodnie z wymaganiami norm metrologicznych. W wielu ćwiczeniach laboratoryjnych trudność studentów nie wynika z samego odczytu wskazań przyrządu, lecz z poprawnego przygotowania pomiaru, ustawienia elementów pomiarowych oraz interpretacji zjawisk fizycznych stanowiących podstawę metody pomiarowej. Technologie MR mogą wspierać właśnie ten etap procesu uczenia się poprzez wizualizację zjawisk niewidocznych bezpośrednio oraz prowadzenie użytkownika przez kolejne kroki procedury pomiarowej.

1. Przegląd literatury

Zastosowania AR i MR w inspekcji jakości i kontroli wymiarowej dokumentowane są w literaturze od połowy drugiej dekady XXI wieku. Zapciu i in. [2017] oraz Bodi i in. [2016] opisali wczesne demonstracje systemów AR nakładających dane CAD i wyniki pomiarów bezpośrednio na fizyczne obiekty inspekcji, otwierając kierunek badań nad integracją wizualizacji z procesem kontroli. Systematyczny przegląd literatury zorientowany na użytkownika [Albers i in., 2023] wykazał, że zastosowania AR w kontroli jakości koncentrują się w trzech obszarach: inspekcji wizualnej, wspomaganiu montażu z kontrolą jakości oraz pomiarach i weryfikacji wymiarów. Nawab i Allen [2022] zaprezentowali niskokosztowy system AR do metrologii wymiarowej przy montażu, łącząc rejestry przestrzenne AR z pomiarem tolerancji, stanowiąc bezpośrednie powiązanie AR z metrologią przemysłową. Sauer i in. [2021] wykazali skuteczność połączenia AR ze skanowaniem 3D przy inspekcji geometrycznej dużych części mechanicznych, uzyskując poziom dokładności porównywalny z tradycyjnymi metodami pomiarowymi.

Istotnym dowodem skuteczności formatu HMD (Human Mobile Devices) w inspekcji jakości jest badanie eksperymentalne Seeligera i in. [2023], przeprowadzone z udziałem operatorów przemysłowych. Porównane zostały trzy formaty instrukcji (papierowa, wyświetlana na ekranie komputera i wyświetlana za pomocą HMD). Format HMD okazał się istotnie lepszy od obu alternatyw pod względem czasu wykonania zadania, liczby błędów i subiektywnie ocenianego obciążenia poznawczego (cognitive load). Autorzy wyjaśniają przewagę dwoma mechanizmami, wolnymi rękami operatora oraz przestrzennym zakotwiczeniem instrukcji przy fizycznym

obiekcie inspekcji, eliminującym konieczność mentalnego „tłumaczenia" rysunku na trójwymiarowy przyrząd. Rio-Torto i in. [2022] potwierdzili praktyczną stronę tego spostrzeżenia, zastępując papierową listę kontrolną w linii inspekcji motoryzacyjnej systemem hybrydowym AR, uzyskując wzrost efektywności operatora przy jednoczesnej redukcji błędów.

Bardziej szczegółowe wyniki dotyczące formatu HMD przy inspekcji jakości dostarczają prace Havlíková i in. [2023a; 2023b], którzy w dwuetapowym projekcie zaprojektowali i przetestowali interaktywne narzędzie AR na HoloLens 2 do inspekcji jakości spawów. Badanie pilotażowe wykazało pozytywne oceny użyteczności systemu, a pełne badanie potwierdziło skrócenie czasu inspekcji i redukcję pominiętych defektów w porównaniu z inspekcją bez wspomagania AR. Frandsen i in. [2023] rozwinęli koncepcję mobilnego asystenta AR do konserwacji i inspekcji jakości na urządzeniach przenośnych, demonstrując możliwość działania bez dedykowanego HMD. W 2025 roku Chadaran i in. [2025] opublikowali wyniki wdrożenia AR w inspekcji nadwozi samochodowych, dokumentując redukcję czasu inspekcji o około 20% i poprawę spójności wyników między operatorami. Yang H. i in. [2025] ocenili skuteczność i użyteczność przestrzennej AR (SAR) w inspekcji produktu, potwierdzając zadowalające wyniki dla procedur wieloetapowych. Karlsson i in. [2025] wskazują na kierunek integracji MR z algorytmami systemów widzenia komputerowego jako najnowszy trend w dążeniu do produkcji zero-defektów.

Dostępne na rynku platformy AR/MR różnią się istotnie pod względem wymagań technicznych, modelu licencyjnego i grupy docelowej. Kolla i in. [2021] przeprowadzili porównanie wiodących platform takich jak Vuforia (PTC), Unity MRTK, Scope AR WorkLink i rozwiązań opartych na HoloLens. Wskazali na wyraźną różnicę między platformami deweloperskimi (wymagającymi znajomości Unity lub podobnego środowiska), a platformami no-code adresowanymi do ekspertów domenowych bez kompetencji programistycznych. Neges i in. [2019] zaprezentowali asystenta MR opartego na danych PMI (ang. Product Manufacturing Information) zintegrowanych z modelami CAD, wskazując, że powiązanie danych z systemu PDM/PLM bezpośrednio z holograficzną instrukcją eliminuje konieczność ręcznego przygotowania treści. Kolla i in. [2023] w kontekście Przemysłu 4.0 klasyfikują platformy MR według stopnia integracji z systemami ERP/MES, przy czym Dynamics 365 Guides zaliczany jest do grupy rozwiązań oferujących natywną integrację z ekosystemem Microsoft Dynamics.

Odrębny kierunek rozwoju wyznaczają platformy wzbogacone o sztuczną inteligencję. Li i in. [2024] zaprezentowali system AR oparty na „deep learning" do generowania instrukcji dla złożonego montażu ręcznego. Model AI automatycznie rozpoznaje etap procesu i wyświetla odpowiedni krok przewodnika bez ręcznego

nawigowania użytkownika. Siewert i in. [2023] powiązali platformę AR z koncepcją Asset Administration Shell (AAS), umożliwiając dynamiczne pobieranie aktualnych danych o przyrządzie (kalibracja, historia serwisowa) bezpośrednio do holograficznej karty instrukcji, jest to szczególnie istotne w aspekcie metrologicznym, gdzie aktualne świadectwo wzorcowania jest istotnym elementem SOP. Sauer i in. [2021] wskazali, że kombinacja AR ze skanowaniem 3D pozwala wykroczyć poza instrukcje w kierunku AR jako narzędzia pomiarowego, nakładającego wzorzec geometryczny na skanowany obiekt.

Szczególna wartość AR w środowiskach laboratoryjnych dotyczy właśnie umiejętności praktycznych. Meta-analiza obejmująca 134 badania quasi-eksperymentalne [Chen i in., 2022] wykazała istotnie pozytywny efekt AR na wyniki uczenia się na poziomie wiedzy, umiejętności i postaw. Wyniki wskazują, że AR najlepiej sprawdza się w kształtowaniu umiejętności praktycznych, a to umacnia jej ogromny potencjał w nauczaniu laboratoryjnym. Akçayır i in. [2016] wykazali w badaniu quasi-eksperymentalnym, że studenci korzystający z AR w laboratoriach nauk przyrodniczych osiągali istotnie wyższe umiejętności praktyczne i bardziej pozytywne postawy wobec ćwiczeń niż grupa kontrolna z tradycyjną instrukcją. Álvarez-Marín i Velázquez-Iturbide [2024] w przeglądzie AR w kształceniu wyższym podkreślają, że technologie cyfrowe sprzyjają konstruktywizmowi kognitywnemu, umożliwiając studentom interaktywne eksplorowanie zjawisk niedostępnych percepcji wizualnej.

Implementacja technologii XR w procesach produkcyjnych i dydaktycznych posiada własne udokumentowane podstawy empiryczne. Tomaszewska [2025] w wielowymiarowej analizie STEEPVL oraz SWOT dotyczącej zastosowań technologii XR w przemyśle wykazała, że rozwiązania te w istotny sposób zwiększają produktywność, usprawniają procesy szkoleniowe oraz wspierają diagnostykę urządzeń. Jednocześnie wskazała na bariery związane z ich wdrażaniem, takie jak wysokie koszty początkowe, konieczność systematycznego podnoszenia kompetencji personelu oraz ryzyko szybkiego starzenia się sprzętu [Tomaszewska, 2025]. Urban i Tomaszewska (2026) zaproponowali metodykę ROIm (Return on Improvement), która wspiera podejmowanie decyzji dotyczących wyboru obszarów wdrażania technologii XR w mapowaniu strumienia wartości (VSM). Wyniki pilotażowych studiów przypadku obejmujących procesy projektowania oraz utrzymania ruchu wykazały skrócenie czasu realizacji o 18%, ograniczenie liczby fizycznych prototypów z czterech do jednego w cyklu projektowym, a także zmniejszenie czasu przestojów maszyn. Rezultaty te potwierdzają, że wykorzystanie immersyjnych narzędzi cyfrowych może w mierzalny sposób wpływać na parametry procesów [Urban i Tomaszewska, 2026].

Istotną przesłanką do wdrożenia technologii AR w laboratorium pomiarowym są również doświadczenia z realizacji immersyjnej instrukcji przygotowania frezarki CNC opracowanej w technologii AR w laboratorium Wydziału Inżynierii Zarządzania Politechniki Białostockiej [Tomaszewska, Czubaszek, 2026; przyjęty do druku]. W iteracyjnym badaniu przeprowadzonym z udziałem 11 osób, obejmującym eksperta oraz studentów zarówno z doświadczeniem, jak i bez doświadczenia, wykazano, że instrukcja AR oparta na urządzeniu HoloLens 2 i środowisku immersyjnym zmniejszyła liczbę problematycznych zdarzeń o 90% (z 49 do jednego przypadku), skróciła czas przygotowania maszyny o 42% oraz zwiększyła samodzielność studentów o 150%, rozumianą jako zdolność do wykonania całej procedury bez pomocy prowadzącego. Zainteresowanie technologiami AR na wydziale potwierdza również przegląd darmowych narzędzi AR do wizualizacji modeli CAD w prototypowaniu [Gryc i in., 2026], wskazując, że tematyka cyfrowych technologii immersyjnych jest aktywnie eksplorowana w środowisku akademickim WIZ PB.

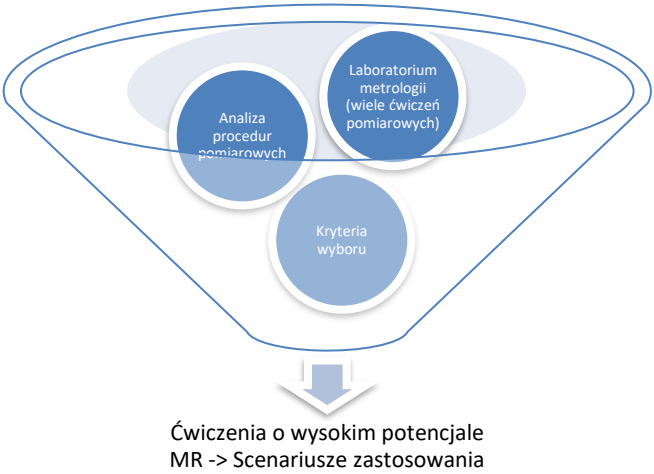
Microsoft HoloLens 2 to urządzenie rzeczywistości mieszanej typu HMD (Head-Mounted Display), które umożliwia wyświetlanie hologramów zakotwiczonych w przestrzeni, przy jednoczesnym zachowaniu pełnej swobody rąk użytkownika. Połączony z Dynamics 365 Guides tworzy platformę do tworzenia holograficznych instrukcji bez konieczności programowania. Tworzenie przewodnika obejmuje dwa etapy takie jak definiowanie struktury (zadania, kroki, multimedia, modele 3D) w PC Authoring Tool oraz kalibrację przestrzenną hologramów przy fizycznym stanowisku w widoku HoloLens. Po jednorazowej kalibracji każdy użytkownik widzi te same hologramy w tych samych pozycjach względem sprzętu pomiarowego, niezależnie od tego, kto zakłada urządzenie. Platforma jest stosowana w szkoleniach przemysłowych przez firmy z sektora lotniczego i motoryzacyjnego [Microsoft Learn, 2024; Kolla i in., 2023].

Stabilność zakotwiczenia hologramów w środowisku dydaktycznym jest warunkiem prawidłowego działania stanowiska. HoloLens 2 obsługuje kotwiczenie oparte na kodzie QR (QR anchor), w którym prowadzący mocuje wydrukowany kod QR w stałym punkcie stanowiska (na przykład na korpusie przyrządu pomiarowego lub dedykowanej ramce przy blacie). Każdorazowe uruchomienie przewodnika rozpoczyna się od zeskanowania kodu QR przez studenta, a to jednoznacznie ustala punkt odniesienia hologramów względem rzeczywistego sprzętu, niezależnie od drobnych przesunięć mebli między sesjami laboratoryjnymi. Jest to rozwiązanie preferowane w warunkach sali dydaktycznej, ponieważ nie wymaga bogatej tekstury otoczenia, którą zakładają kotwice przestrzenne (spatial anchors).

2. Metodyka badań

Artykuł ma charakter przeglądowo-koncepcyjny i opiera się na dwuetapowej metodyce. W pierwszym etapie przeprowadzono przegląd literatury z lat 2015-2026 z baz Scopus i Web of Science z użyciem słów kluczowych („augmented reality" OR „AR" OR „MR" OR „mixed reality") AND („metrology education" OR „quality inspection" OR „measurement lab*" OR „work instruction"). Kryterium włączenia stanowiły recenzowane artykuły w języku angielskim, z bezpośrednim związkiem z AR/MR w kontekście dydaktyki inżynierskiej, inspekcji lub instrukcji. Wstępne wyszukiwanie zawierało 151 publikacji (Scopus 89; WoS 62). Po usunięciu duplikatów n = 122, natomiast po selekcji tematycznej do analizy włączono n = 45 artykułów. Z dalszej analizy wykluczono publikacje dotyczące wyłącznie medycyny, przemysłu spożywczego, izotopów oraz algorytmów uczenia maszynowego bez powiązania z AR.

W drugim etapie, na podstawie analizy możliwości HoloLens 2 z Dynamics 365 Guides (dokumentacja Microsoft Learn, materiały szkoleniowe) oraz diagnozy dydaktycznej istniejącego laboratorium pomiarowego, opracowano koncepcję wdrożenia holograficznego stanowiska. Dla każdej z trzech proponowanych procedur pomiarowych określono strukturę przewodnika (zadania i kroki), treść holograficznych kart instrukcji, elementy 3D z biblioteki hologramów oraz dydaktyczne uzasadnienie wyboru tej procedury.



Rys. 1. Schemat identyfikacji ćwiczeń laboratoryjnych o wysokim potencjale zastosowania MR
Źródło: opracowanie własne.

Dobór ćwiczeń laboratoryjnych do scenariuszy holograficznych przeprowadzono na podstawie analizy procedur realizowanych w laboratorium metrologii. Kryterium wyboru był przede wszystkim charakter samej procedury. Wzięto pod uwagę ćwiczenia, w których student napotyka zjawiska niedostępne bezpośredniej obserwacji, złożone sekwencje czynności manualnych albo trudności interpretacyjne przy ocenie wyników. Schemat procesu identyfikacji ćwiczeń o wysokim potencjale zastosowania technologii mieszanej rzeczywistości przedstawiono na rys. 1.

3. Wyniki badań

3.1. Koncepcja holograficznego stanowiska dydaktycznego

Proponowana infrastruktura MR opiera się na jednym zestawie sprzętu, to znaczy komputerze z zainstalowaną aplikacją PC Authoring Tool oraz urządzeniu HoloLens 2. Komputer pełni rolę stacji autorskiej, prowadzący tworzy i aktualizuje przewodniki z poziomu przeglądarki, bez konieczności dostępu do stanowisk pomiarowych. HoloLens 2 jest urządzeniem przenośnym, zatem student zakłada je i podchodzi z nim kolejno do każdego ćwiczenia laboratoryjnego, przy którym opracowano przewodnik. Nie jest to więc wydzielone stanowisko dydaktyczne w rozumieniu fizycznie zajętego miejsca w sali, lecz warstwa instruktażowa nakładana na istniejące stanowiska pomiarowe. Infrastruktura pełni trzy role dydaktyczne. Pierwsza umożliwia studentom wykonanie wybranych procedur pomiarowych z holograficznym prowadzeniem krok po kroku (format „ręce wolne"). Druga demonstruje typ dokumentacji stanowiskowej stosowanej w przemysłowych systemach Przemysłu 4.0. Natomiast trzecia dostarcza prowadzącemu danych analitycznych o trudnościach studentów na poszczególnych krokach. Przy strukturze podgrup 4-osobowych jeden zestaw HoloLens 2 obsługuje grupę bez konieczności wydłużania zajęć; studenci oczekujący obserwują pracę kolegi, jest to dodatkowa wartość dydaktyczna przez porównanie formatu holograficznego z instrukcją papierową używaną równolegle na pozostałych stanowiskach.

Uruchomienie stanowiska nie wymaga zakupu nowego sprzętu. Techniczne warunki uruchomienia obejmują między innymi jednorazowe zapoznanie prowadzącego z PC Authoring Tool, przygotowanie przewodników oraz kalibrację przestrzenną hologramów przy stanowisku (jednorazowo po przygotowaniu każdego przewodnika). Przygotowanie treści dzieli się na dwa poziomy złożoności. Poziom podstawowy obejmuje karty tekstowe, strzałki i proste modele geometryczne z wbudowanej biblioteki hologramów D365 Guides (jest dostępny dla prowadzącego bez

znajomości modelowania 3D); czas od zera do działającego pierwszego przewodnika na tym poziomie szacuje się na kilkanaście godzin wraz ze szkoleniem online dostępnym w dokumentacji platformy. Poziom zaawansowany, obejmujący animowane modele 3D (jak wizualizacja propagacji fali US w przekroju materiału), wymaga pliku w formacie .glb lub .fbx, który może zostać przygotowany w środowisku Blender lub osadzony jako krótki plik wideo (.mp4) nagrany z symulacji bądź zaczerpnięty z zasobów edukacyjnych na otwartej licencji. Alternatywnie przygotowanie takich modeli może stanowić temat pracy dyplomowej lub projektu studenckiego, jednocześnie poszerzają bazę treści i angażując studentów w tworzenie narzędzi dydaktycznych.

3.2. Dobór procedur pomiarowych do holografizacji

Nie każda procedura laboratoryjna w równym stopniu zyskuje na holograficznej formie instrukcji. Na podstawie literatury [Seeliger i in., 2023; Albers i in., 2023] oraz analizy specyfiki procedur pomiarowych sformułowano trzy kryteria kwalifikacji (A) procedura jest wieloetapowa i sekwencyjna, błąd na jednym kroku uniemożliwia poprawne wykonanie kolejnych; (B) procedura wymaga precyzji manualnej, przy której odłożenie instrukcji zakłóca pomiar; (C) procedura zawiera zjawisko fizyczne lub relację przestrzenną trudną do jednoznacznego zobrazowania w instrukcji dwuwymiarowej. Tabela 1 zestawia ocenę trzech zaproponowanych procedur.

Tab. 1. Dobór procedur pomiarowych do holograficznych przewodników z uzasadanieniem

Procedura	A	B	C	Uzasadnienie
Pomiar grubości metodą ultradźwiękową (grubościomierz)	+	+	++	Szczególnie silne kryterium C. Propagacja fali US przez materiał jest niewidoczna, hologram przy głowicy może animować przekrój próbki z falą. Konieczność utrzymania głowicy prostopadle do powierzchni uzasadnia format „ręce wolne" [Seeliger i in., 2023].
Pomiar gwintu metodą trójwałeczkową (mikrometr talerzykowy)	++	+	-	Złożona procedura (dobór wałeczków, trójpunktowe ułożenie przy mikrometrze, wykonanie pomiaru oraz obliczenie średnicy podziałowej). Hologram w 3D przy fizycznym przyrządzie eliminuje wielokrotne rysunki z różnych perspektyw wymagane w instrukcji papierowej.
Obsługa profilografometru (pomiar chropowatości)	+	+	+	Krytyczne ustawienie ramienia pomiarowego (prostopadłość, kierunek ruchu, dobór odcinka elementarnego λc). Skala chropowatości (Ra/Rz) niewidoczna gołym okiem, hologram wizualizuje profil i skalę przy fizycznym wzorcu.

Procedura	A	B	C	Uzasadnienie
Pomiar średnicy zewnętrznej (mikrometr zewnętrzny; suwmiarka)	+	+	–	Procedura krótka i powtarzalna; geometria kontaktu równoległych powierzchni jest prosta i jednoznacznie opisywalna rysunkiem rzutowym. Hologram nie wnosi przewagi nad demonstracją prowadzącego. Nie wybrano do wdrożenia.
Pomiar parametrów kół zębatych	++	+	++	Geometria ewolwenty, skok i angażowanie zazębienia są trudne do zobrazowania w instrukcji 2D; procedura jest wieloetapowa. Stanowisko ma wysoki potencjał holografizacji. Złożoność przygotowania modeli 3D (profil ewolwenty, układ zębnik-koło) uzasadnia wskazanie go jako etap II wdrożenia po ustabilizowaniu pierwszych trzech przewodników.
Pomiar średnicy wewnętrznej (średnicówka mikrometryczna; suwmiarka)	+	++	–	Centrowanie średnicówki w otworze wymaga wysokiej precyzji manualnej (kryterium B spełnione w silnym stopniu), jednak geometria pomiaru nie zawiera elementów trudnych do zobrazowania w instrukcji 2D. Wartość hologramu jest ograniczona w porównaniu z wybranymi procedurami. Nie wybrano do wdrożenia.

Źródło: opracowanie własne. (++ kryterium spełnione w szczególnie silnym stopniu; – kryterium niespełnione, procedura nie wybrana do wdrożenia w I etapie.)

3.3. Scenariusze wdrożenia

3.3.1. Pomiar grubości metodą ultradźwiękową

Grubościomierz ultradźwiękowy jest przyrządem o najwyższym potencjale dla holografizacji, ponieważ wzorzec fizyczny fali US w materiale jest niedostępny żadnemu innemu medium w warunkach laboratoryjnych. Studenci mają trudność z intuicyjnym rozumieniem pomiaru czasu przelotu fali bez wizualizacji, dodatkowo mają problemy z prawidłowym wykonywaniem pomiarów dla różnych materiałów.

Instrukcja w Hololens 2 mogłaby zawierać:

- Krok 1 związany z przygotowaniem próbki (Hologram strzałki nad próbką oraz informacja „Oczyść powierzchnię. Nałóż środek sprzęgający np.wodę")
- Krok 2 związany z kalibracją urządzenia (Informacja wyświetlana przy ekranie grubościomierza wraz z tabelą ustawień odpowiednich dla różnych materiałów)
- Krok 3 związany z pomiarem (Animowany hologram przy głowicy pomiarowej oraz wizualizacja przekroju próbki przedstawiająca propagację fali ultradźwiękowej, czyli przejście fali od głowicy przez materiał, jej odbicie od tylnej ścianki oraz powrót do głowicy. Nad próbką może być wyświetlany odpowiedni wzór opisujący zależność pomiarową.)

- Krok 4 odczyt i zapis
- Krok 5 powtórzenie dla drugiego materiału i porównanie wyników

Najważniejszym elementem holograficznym w tym ćwiczeniu byłaby animacja propagacji fali ultradźwiękowej w przekroju materiału, zakotwiczona przy fizycznej głowicy pomiarowej. Alternatywą może być krótkie nagranie wideo ilustrujące przejście impulsu przez warstwę materiału. W obu przypadkach chodzi o to samo, uwidocznienie zjawiska, którego nie da się zaobserwować bez spejcalistycznej aparatury obrazującej. Zgodnie z argumentacją Álvarez-Marín i Velázquez-Iturbide (2024), jest to właśnie ten typ „zjawisk niedostępnych zmysłom", dla których rozszerzona rzeczywistość wykazuje największą wartość dydaktyczną.

3.3.2. Pomiar gwintu metodą trójwałeczkową

Metoda trójwałeczkowa jest jedną z najdokładniejszych metod wyznaczania średnicy podziałowej gwintu (d_2). Jednocześnie jest procedurą podatną na błędy na etapie pozycjonowania wałeczków pomiarowych pomiędzy powierzchniami gwintu oraz szczękami mikrometru (najczęściej mikrometru z końcówkami talerzykowymi). Nieprawidłowe ułożenie wałeczków stanowi jedną z najczęstszych przyczyn błędnych wyników pomiaru i jest trudne do wyeliminowania wyłącznie na podstawie opisu słownego w instrukcji papierowej. Hologram 3D zakotwiczony przy fizycznym mikrometrze mógłby prezentować zarówno prawidłową konfigurację pomiarową, jak i najczęściej występujące błędy ustawienia, eliminując konieczność interpretowania rysunków rzutowych.

Instrukcja realizowana z wykorzystaniem Microsoft HoloLens 2 mogłaby obejmować następujące etapy:

- Krok 1 związany z doborem wałeczków pomiarowych (Hologram tabeli przedstawiającej zależność pomiędzy skokiem gwintu a zalecaną średnicą wałeczków pomiarowych, wyświetlany nad zestawem wałeczków znajdujących się na stanowisku pomiarowym)
- Krok 2 ułożenie wałeczków (Animowany hologram pokazujący prawidłowe trójpunktowe ułożenie wałeczków w zwojach gwintu oraz ich kontakt z powierzchniami gwintu i szczękami mikrometru. Jednocześnie może być pokazany przykład typowego błędu, np. nieosiowego ułożenia wałeczka lub jego wysunięcia z właściwej pozycji)
- Krok 3 wykonanie pomiaru wymiaru M (Karta instrukcyjna wyświetlana przy mikrometrze z procedurą wykonania pomiaru średnicy M (odległości mierzonej przez mikrometr ponad trzema wałeczkami)
- Krok 4 obliczenia średnicy podziałowej d_2 (Przykładowe obliczenie z podstawionymi wartościami dla gwintu metrycznego, wyświetlane nad próbką

lub stanowiskiem pomiarowym., z podstawionymi wartościami dla gwintu metrycznego)
- Krok 5 weryfikacja i zapis (Porównanie uzyskanego wyniku z wartością nominalną oraz zapis wyniku pomiaru).

3.3.3. Obsługa profilografometru

Profilografometr (profilometr stykowy dostępny w laboratorium) wymaga prawidłowego doboru parametrów pomiaru, takich jak odcinek elementarny λc, długość oceny czy prędkość przesuwu końcówki pomiarowej, w zależności od klasy chropowatości badanej powierzchni. Dla studentów szczególnie problematyczna jest interpretacja skali parametrów chropowatości, takich jak Ra czy Rz, ponieważ wartości rzędu 1 μm są niemożliwe do bezpośredniego zaobserwowania gołym okiem. Hologram animowany nakładany na fizyczny wzorzec chropowatości umożliwiłby zobaczenie profilu powierzchni w powiększeniu geometrycznie powiązanym z trzymanym w ręku wzorcem. Stanowi to przykład kontekstualizacji abstrakcyjnych danych pomiarowych, opisywanej przez Akçayır i współautorów (2016) jako jeden z czynników poprawiających rozumienie zagadnień w laboratoriach wspomaganych technologią AR.

Instrukcja realizowana z wykorzystaniem Microsoft HoloLens 2 mogłaby obejmować następujące etapy:
- Krok 1 dobór parametrów pomiaru (hologram tabeli zgodnej z normą ISO 21920, wyświetlany przy pulpicie sterowania profilografometru, ułatwiający dobór odcinka elementarnego λc w zależności od spodziewanej wartości chropowatości)
- Krok 2 ustawienie ramienia pomiarowego (hologram przy ramieniu pomiarowym wskazujący kierunek przesuwu końcówki pomiarowej, wymaganą prostopadłość względem kierunku śladów obróbki oraz animację prawidłowego i błędnego ustawienia)
- Krok 3 zerowanie i wykonanie pomiaru (instrukcja przeprowadzenia procedury zerowania oraz rozpoczęcia pomiaru)
- Krok 4 interpretacja wykresu na profilogramie (animowany hologram profilu chropowatości prezentujący parametry Ra i Rz w powiększeniu pionowym (np. ×5000), nakładany na wydruk lub ekran z wynikiem pomiaru).
- Krok 5 porównanie powierzchni (hologram zestawiający profile dla powierzchni frezowanej, toczonej, szlifowanej, zużytej)

Syntetyczne zestawienie wszystkich trzech przewodników, wraz z typem elementu holograficznego i wartością dydaktyczną względem instrukcji papierowej przedstawiono w (tab. 2).

Tab. 2. Zestawienie holograficznych przewodników (elementy i wartość dydaktyczna)

Przewodnik	Kroki łącznie	Hologram 3D – typ	Hologram 3D – treść	Wartość dydaktyczna vs instrukcja papierowa
1. Grubościomierz ultradźwiękowy	5	Animacja 3D przy głowicy	Fala US w przekroju; wzór TOF	Jedyna metoda wizualizacji fizyki pomiaru; eliminuje błędy przy wyborze ustawień grubościomierz w zależności od materiału
2. Metoda trójwałeczkowa	5	Model 3D przy mikrometrze	Prawidłowe/błędne ułożenie wałeczków	Przestrzenne pokazanie krytycznego etapu niemożliwego do opisania rysunkami rzutowymi
3. Profilografometr	5	Animacja przy ramieniu i wzorcu	Prostopadłość ramienia; profil Ra/Rz ×5000	Doprecyzowanie abstrakcyjnych parametrów przy fizycznym wzorcu chropowatości

Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie w Tab. 2 wskazuje, że wszystkie trzy przewodniki dzielą tę samą strukturę organizacyjną (5 kroków), różniąc się wyłącznie typem i treścią elementu holograficznego. Warto przy tym zwrócić uwagę na pewną gradację. Dla grubościomierza ultradźwiękowego hologram stanowi jedyne możliwe medium wizualizacji niewidocznej fizyki pomiaru, o tyle dla pozostałych procedur pełni przede wszystkim funkcję orientacji przestrzennej i redukcji obciążenia poznawczego. Przedstawiona różnica uzasadnia przyjęty priorytet wdrożeniowy.

3.4. Implikacje dla modernizacji laboratorium

Proponowana koncepcja holograficznych przewodników nie wymaga wymiany istniejącej aparatury pomiarowej, jednak w niektórych przypadkach wskazane jest uzupełnienie wyposażenia stanowisk dydaktycznych o elementy zwiększające wartość porównawczą ćwiczeń. W przypadku stanowiska do pomiaru gwintu metodą trójwałeczkową rekomendowane jest wprowadzenie zestawu sprawdzianów gwintowych przechodnich i nieprzechodnich oraz kilku elementów z gwintami metrycznymi o różnych średnicach i skokach. Umożliwi to studentom zestawienie wyników dokładnego pomiaru średnicy podziałowej gwintu z kontrolą warsztatową typu GO/NOGO stosowaną w praktyce przemysłowej.

W przypadku stanowiska związanego z pomiarami chropowatości powierzchni, zasadne byłoby uzupełnienie wyposażenia o zestaw próbek dydaktycznych (np. kilka powierzchni wytworzonych różnymi metodami obróbki tj. toczenie, frezowanie, szlifowanie oraz jedną próbkę ze śladami zużycia eksploatacyjnego. Student mógłby wtedy nie tylko zmierzyć chropowatość, lecz samodzielnie powiązać uzyskane wartości Ra z konkretnym procesem technologicznym lub trybem eksploatacji, nadając ćwiczeniu wymiar interpretacyjny, niedostępny przy typowych próbkach wzorcowych.

4. Dyskusja wyników

4.1. Zalety holograficznego formatu instrukcji

Zaproponowana infrastruktura MR oferuje trzy przewagi niedostępne klasycznej instrukcji papierowej. Pierwszą i najważniejszą z punktu widzenia precyzji pomiarowej jest format „ręce wolne". Seeliger i in. [2023] wykazali eksperymentalnie, że HMD przewyższa zarówno instrukcję papierową, jak i ekran komputera, ponieważ eliminuje konieczność przeniesienia wzroku z obiektu na nośnik informacji. W przypadku ćwiczeń pomiarowych, gdzie prawidłowe pozycjonowanie głowicy US, wałeczków przy mikrometrze czy ramienia profilografometru wymaga pełnej koncentracji manualnej, przewaga ta jest bezpośrednio przekładalna na redukcję błędów wykonania.

Drugą przewagą jest przestrzenne zakotwiczenie hologramów przy fizycznych elementach stanowiska, co eliminuje obciążenie poznawcze wynikające z konieczności mapowania między treścią instrukcji, a trójwymiarowym przyrządem. Efekt ten opisany jest jako „tłumaczenie rysunku na obiekt" przez Seeligera i in. [2023]. Dla procedur zawierających zjawiska niewidoczne (fala US, profil chropowatości w skali μm) hologram jest jedynym medium umożliwiającym takie zakotwiczenie. Fortuna i in. [2024] wykazali, że jakość renderowania AR wpływa bezpośrednio na skuteczność inspekcji, implikując, że treść hologramów powinna być dopracowana graficznie przez prowadzącego.

Trzecią przewagą są wbudowane funkcje analityczne. Dynamics 365 Guides automatycznie rejestruje czas spędzony przez każdego użytkownika na każdym kroku przewodnika. Prowadzący uzyskuje tym samym gotowy wskaźnik trudności poszczególnych etapów procedury (bez żadnego dodatkowego narzędzia badawczego). Dane te są potencjalnie użyteczne zarówno do optymalizacji samego przewodnika, jak i do przeprowadzenia empirycznego badania efektywności dydaktycznej.

4.2. Ograniczenia i warunki wdrożenia

Przedstawiona koncepcja ma istotne ograniczenia organizacyjne. Laboratorium z metrologii prowadzone jest w cyklu 8 tygodni po 2 godziny lekcyjne tygodniowo; studenci pracują w podgrupach 3/4-osobowych, każda z podgrupą realizuje kolejno poszczególne stanowiska. W takiej strukturze jedyny zestaw HoloLens 2 obsługuje 4 studentów na jedno spotkanie, każdy z nich dysponuje kilkunastoma minutami przy stanowisku, co jest czasem wystarczającym do samodzielnego przejścia pełnego przewodnika. Ograniczenie nie dotyczy więc dostępu do urządzenia, lecz raczej jednoczesności. Studenci oczekujący obserwują pracę kolegi, co tworzy wartościową sytuację dydaktyczną, ponieważ pozwala porównać format holograficzny z instrukcją papierową używaną równolegle na pozostałych stanowiskach. W razie potrzeby możliwe jest wydłużenie cyklu lub dodanie dedykowanej sesji przy stanowisku MR.

Kolejnym ograniczeniem jest krzywa uczenia narzędzia. Choć Dynamics 365 Guides jest no-code, pierwsze zetknięcie prowadzącego z aplikacją wymaga inwestycji czasu. Szacowany czas od zera do samodzielnie uruchomionego pierwszego przewodnika na poziomie podstawowym (karty tekstowe, strzałki, osadzone zdjęcia etapów) wynosi kilkanaście godzin łącznie ze szkoleniem online z Microsoft Learn. Czas ten nie obejmuje przygotowania zaawansowanych elementów holograficznych, takich jak animowane modele 3D, które stanowią osobną fazę przygotowania treści i mogą być realizowane etapowo, niezależnie od uruchomienia przewodników na poziomie podstawowym.

4.3. Infrastruktura MR jako element przygotowania do rynku pracy

Poza wymiarem stricte dydaktycznym infrastruktura MR spełnia jeszcze jedną funkcję, orientuje studenta w standardach rynku pracy. Absolwent, który na uczelni korzystał z holograficznej instrukcji stanowiskowej, nie traci czasu na oswajanie się z tym narzędziem w pierwszym zakładzie pracy. Umiejętność korzystania z takich systemów, a w perspektywie także ich tworzenia, stając się jedną z kompetencji oczekiwanych przez zaawansowane technologicznie przedsiębiorstwa produkcyjne. Laboratorium pomiarowe wyposażone w platformę HoloLens i Dynamics 365 Guides pełni tym samym rolę demonstratora standardu Przemysłu 4.0 w przestrzeni dydaktycznej uczelni.

Istotną zaletą przyjętego podejścia jest skalowalność. Infrastruktura MR zbudowana na jednym zestawie sprzętu i jednym koncie Dynamics 365 Guides nie jest

ograniczona do laboratorium metrologii ani do konkretnego wydziału. Nowy przewodnik np. dla kolejnego ćwiczenia, innego laboratorium czy innej jednostki dydaktycznej, wymaga wyłącznie czasu prowadzącego na przygotowanie treści; nie generuje dodatkowych kosztów sprzętowych ani informatycznych. Ćwiczenia z elektrotechniki obejmujące montaż obwodów, laboratoria z fizyki wymagające precyzyjnego ustawiania układów optycznych czy zajęcia z mechatroniki; wszystkie te scenariusze spełniają co najmniej dwa z trzech kryteriów kwalifikacji sformułowanych w niniejszym artykule (wieloetapowość i precyzja manualna). Okulary nie są przypisane do konkretnego stanowiska, mogą być wypożyczane między pracowniami tak samo, jak współdzielone są drogie przyrządy pomiarowe. Potencjał rozszerzenia infrastruktury MR na inne jednostki Wydziału lub innych wydziałów uczelni stanowi naturalny kierunek dalszych prac wdrożeniowych.

Podsumowanie

Celem artykułu było opracowanie koncepcji wdrożenia infrastruktury MR w laboratorium pomiarowym na uczelni. Na podstawie przeglądu 45 publikacji z baz Scopus i WoS (2015-2026) oraz analizy platformy HoloLens 2 z Microsoft Dynamics 365 Guides sformułowano następujące wnioski.

- Do wdrożenia pierwszej kolejności rekomenduje się procedury wieloetapowe, wymagające precyzji manualnej lub zawierające zjawiska niewidoczne gołym okiem. Spośród analizowanych ćwiczeń za priorytetowy uznano przewodnik dla grubościomierza ultradźwiękowego, ponieważ wizualizacja propagacji fali ultradźwiękowej jest tu jedynym sposobem na zobrazowanie fizyki pomiaru.
- Tworzenie przewodników w D365 Guides jest możliwe bez programowania (no-code), umożliwiając samodzielne wdrożenie przez prowadzącego zajęcia bez konieczności wsparcia informatycznego
- Ważne ograniczenia to rotacyjny charakter stanowiska (jeden zestaw HoloLens dla grupy do 16 studentów)
- Dane analityczne platformy (czas na krokach) stanowią materiał do planowanego badania empirycznego efektywności holograficznych instrukcji w porównaniu z instrukcją papierową

Koncepcja ma charakter projektowy i nie została empirycznie zweryfikowana. Efektywność dydaktyczna powinna zostać zbadana w układzie quasi-eksperymentalnym z grupą kontrolną; podane szacunki czasochłonności wdrożenia są orientacyjne.

ORCID iD

Klaudia Tomaszewska: https://orcid.org/0000-0002-0233-5707

Literatura

1. Akçayır M., Akçayır G., Pektaş H.M., Ocak M.A. (2016), *Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories*, Computers in Human Behavior, 57, pp. 334-342.
2. Albers A., Bohné T., Tadeja S. (2023), *Augmented Reality for Quality Inspection: A User-Centred Systematic Review of Use Cases, Trends and Technologies*, Proceedings - 2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), pp. 146-153.
3. Álvarez-Marín A., Velázquez-Iturbide J.A. (2024), *Augmented reality in engineering education: enhancing learning and application*, Frontiers in Virtual Reality, 5, 1461145.
4. Bodi Ș., Popescu S., Drăgeanu C., Popescu D. (2016), *Assistive Augmented Environment in Quality Inspection and Statistical Process Control*, Proceedings of the 2016 International Conference on Production Research - Regional Conference Africa, Europe and the Middle East (ICPR-AEM), pp. 493-498.
5. Chadaran R.S., Mokhtar N., Hussin M.S. (2025), *Analysing the process and quality evaluation of body-in-white part inspection methodology using augmented reality*, International Journal of Manufacturing Technology and Management, 39(3-5), pp. 390-405.
6. Chen P., Liu X., Cheng W., Huang R. (2022), *Ten years of augmented reality in education: A meta-analysis of (quasi-)experimental studies to investigate the impact*, Computers & Education, 187, 104541.
7. Gryc A., Kucharczyk W., Tomaszewska K. (2026), *AR jako narzędzie wizualizacji modeli CAD w fazie prototypowania - przegląd darmowych rozwiązań*, Akademia Zarządzania, 10(1), pp. 156-178.
8. Fortuna S., Barbieri L., Marino E., Bruno F. (2024), *A comparative study of Augmented Reality rendering techniques for industrial assembly inspection*, Computers in Industry, 155, 104057.
9. Frandsen J., Tenny J., Frandsen W., Hovanski Y. (2023), *An augmented reality maintenance assistant with real-time quality inspection on handheld mobile devices*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 125(9-10), pp. 4253-4270.
10. Havlíková K., Hořejší P., Kopeček P. (2023a), *An Interactive Augmented Reality Tool to Enhance the Quality Inspection Process in Manufacturing - Pilot Study*, Springer Proceedings in Complexity (Research and Innovation Forum 2022), pp. 155-164.

11. Havlíková K., Hořejší P., Kopeček P. (2023b), *Effect of Augmented Reality Support on Quality Inspection of Welded Structures*, Applied Sciences, 13(21), 11655.
12. Karlsson I., Fathi M., Grahn G., Björnsson A., Wallin E. (2025), *Towards Zero Defect Manufacturing: Computer Vision-Enhanced Mixed Reality for Quality Inspection*, Procedia CIRP, 134.
13. Kolla K., Kumar R., Plapper P. (2023), *Mixed Reality for Industry 4.0 in Manufacturing Systems*, [in:] Handbook of Manufacturing Systems and Design: An Industry 4.0 Perspective, CRC Press, pp. 123-138.
14. Kolla K. S., Sanchez J., Plapper P. (2021), *Comparing software frameworks of augmented reality solutions for manufacturing*, Procedia Manufacturing, 55(C), pp. 312-318.
15. Li W., Xu A., Wei M., Zuo W. (2024), *Deep learning-based augmented reality work instruction assistance system for complex manual assembly*, Journal of Manufacturing Systems, 73, pp. 307-319.
16. Microsoft (2025), *Dynamics 365 Guides and Remote Assist reaching end of support, Microsoft Learn*, https://learn.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/guides/
17. Microsoft Learn (2024), Dynamics 365 Guides documentation - Authoring and operating, https://learn.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/guides/
18. Nawab M.A., Allen J.M. (2022), *Low-Cost AR-Based Dimensional Metrology for Assembly*, Machines, 10(4), 243.
19. Neges M., Adwernat S., Wolf M., Abramovici M. (2019), 3D *Geometry Recognition for a PMI-Based Mixed Reality Assistant System in Prototype Construction*, Advances in Intelligent Systems and Computing, 835, pp. 3-11.
20. Rio-Torto I., Campaniço A.T., Pereira A., Teixeira L.F., Filipe V. (2022), *Hybrid Quality Inspection for the Automotive Industry: Replacing the Paper-Based Conformity List through Semi-Augmented Reality*, Applied Sciences, 12(11), 5687.
21. Sauer M., Heizmann M., Berndt D. (2021), *Combined augmented reality and 3D scanning for the inspection of large mechanical parts*, Technisches Messen, 88(6), pp. 386-395.
22. Seeliger A., Cheng C., Netland T. (2023), *Augmented reality for industrial quality inspection: An experiment assessing task performance and human factors*, Computers in Industry, 151, 103985.
23. Siewert J.L., Wolf M., Vogt O., Gerhard D. (2023), *Implementation of the Asset Administration Shell Concept to Industrial Augmented Reality Applications*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 255-266.
24. Treinen K., Kolla K. (2024), *Augmented Reality for Quality Inspection, Assembly and Remote Assistance in Manufacturing*, Procedia Computer Science, 232, pp. 533-543.

25. Tomaszewska K. Czubaszek M.T. (2026), *Immersive AR instruction for preparing a milling machine in laboratory*, Scientific Papers of Silesian University of Technology - Organization and Management Series - (in press vol. 241).
26. Tomaszewska K. (2025), *XR technology in manufacturing - exploring of practical applications*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie, 217, pp. 573-591.
27. Urban W., Tomaszewska K. (2026), *Where to Use XR Technologies in a Company? A Decision-Making Approach Using the Value Stream Approach*, [in:] Advances in Production Management Systems. Cyber-Physical-Human Production Systems, IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 766, Springer, pp. 474-488.
28. Yang H., Wang P., Luo R., Zhao S., Zhang Y. (2025), *Evaluating the effectiveness and usability of SAR-based inspection application for product quality*, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 256, 118293.
29. Zapciu A., Amza G., Popescu A. (2017), *Augmented reality experience for quality inspection*, International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 17(21), pp. 153-158.

Mixed Reality in a Metrology Laboratory – HoloLens 2 Implementation Concept

Abstract

Measurement laboratories at technical universities constitute a key environment for developing the metrological competencies of future engineers. Despite their long tradition, paper instructions at laboratory workstations do not reflect the standards of technical documentation encountered by technical university graduates in industry. Mixed reality technologies, particularly the Microsoft HoloLens 2 platform with the Dynamics 365 Guides application, enable the creation of holographic instructions without programming knowledge, directly by the instructor. The aim of this article is to develop a concept for implementing a teaching station in a measurement laboratory at a technical university using the HoloLens 2 and Dynamics 365 Guides infrastructure. This article is a conceptual overview; based on a literature review of 45 publications from the Scopus and Web of Science databases (2015-2026) and an analysis of the platform's capabilities, holographic guide scenarios are proposed for three measurement procedures (thickness measurement using the ultrasonic method, thread measurement using the three-roller method, and operation of a profilograph meter). The advantages, limitations, and prospects for further development of the station are discussed. The article demonstrates that MR technology, already available at the

faculty, can improve the quality of metrology education without replacing existing measurement equipment.

Key words

mixed reality, HoloLens 2, Microsoft Dynamics 365 Guides, digital instructions, measurement laboratory