

Titel des Vorhabens: Learning Progression Analytics – Analyzing Learning for Individualized Competence development in Mathematics and Science Education (ALICE)

Projektnummer/Aktenzeichen: K365

Executive Summary

Ziel des Projekts „Analyzing Learning for Individualized Competence Development in Mathematics and Science Education“ (ALICE) war, zu untersuchen, inwieweit sich die beim Einsatz digitaler Technologien im mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht anfallenden Prozess- und Produktdaten nutzen lassen, um das Lernen der Schüler:innen zu erfassen, Lernverläufe zu rekonstruieren und vorherzusagen, inwieweit diese Lernverläufe im Hinblick auf die (langfristige) Entwicklung von Kompetenz produktiv oder unproduktiv sind. Dazu wurde jeweils eine digital gestützte Unterrichtseinheit in den Fächern Mathematik, Biologie, Chemie und Physik entwickelt. Über ein digitales Arbeitsbuch wurden die im Rahmen der Unterrichtseinheit von den Schüler:innen generierten Produkte und der Prozess ihrer Entstehung erfasst. Insgesamt konnten Daten von 73 Klassen und 1483 Schüler:innen erhoben werden und im Hinblick auf die o.g. Zielsetzung mit Verfahren des maschinellen Lernens ausgewertet werden.

Das Arbeitsprogramm konnte weitestgehend wie vorgesehen abgeschlossen werden. Insbesondere konnte ein Konzept digital gestützten forschend-entdeckenden mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts als Grundlage der Entwicklung digitaler Unterrichtseinheiten und ein Verfahren zur Implementation dieses Modells in digital gestützten Unterrichtseinheiten erarbeitet werden – einschließlich der Spezifikation, wie sich Lernen in den Daten manifestiert. Darauf aufbauend wurden vier digital gestützte Unterrichtseinheiten entwickelt. Nach deren Pilotierung und Optimierung, wurden in den Schuljahren 2022/2023 eine erste Kohorte und im Schuljahr 2023/2024 eine zweite Kohorte erhoben. Der finale Datensatz umfasst umfangreiche Hintergrundinformationen zu den Schüler:innen, Prozess- und Produktdaten zu ihrem Lernen, sowie Daten zur Kompetenzentwicklung als Lernergebnis. Dieser Datensatz bietet einzigartige Möglichkeiten, Einsicht in den Zusammenhang von Merkmalen der Schüler:innen, ihren individuellen Lernverläufen und ihrer langfristigen Kompetenzentwicklung zu gewinnen. Die Auswertung der umfangreichen Daten begann unmittelbar mit Abschluss der Erhebung der 1. Kohorte. Trotz der Tatsache, dass sich die menschliche Kodierung der erhobenen Daten als Basis für die Auswertung mit Verfahren des maschinellen Lernens und die Rekrutierung ausreichend qualifizierter Hilfskräfte als aufwändiger erwiesen hat, konnte die Kodierung der für die Analyse der Lernverläufe zentralen Daten bis zum Projektende erfolgreich abgeschlossen und damit wichtige Ergebnisse zu allen drei Fragestellungen gewonnen werden.

Bezüglich der Fragestellung, wie sich aus heterogenen Daten zum Lernen Rückschlüsse auf Lernprozesse ziehen lassen, erwies sich ein Design-Framework als sinnvoll, das ein domänenspezifisches Modell des Lehrens und Lernens mit Design-Verfahren aus dem Bereich der Learning Analytics und *evidence-centered design* kombiniert. Zur Fragestellung, inwieweit sich aus den Lernverläufen der Schüler:innen Kompetenzentwicklung vorhersagen lässt, ergab sich, dass früh im Lernverlauf eine zuverlässige Vorhersage der Kompetenzentwicklung möglich ist. Neben allgemeinen Merkmalen erwiesen sich fachspezifische Merkmale der Lernenden und insbesondere fachspezifische Aspekte des Lernprozesses als prädiktiv; darunter z.B. der Grad der Verknüpfungen mit zentralen Wissens-elementen. Die Befunde sind kongruent mit einschlägigen pädagogisch-psychologischen Theorien und fachdidaktischen Modellen des Lehrens und Lernens. Die Analysen zur dritten Fragestellung nach den Ursachen unproduktiver Lernverläufe erlauben anhand der Unterrichtseinheiten konkrete Rückschlüsse auf solche Ursachen. Es bleibt allerdings nachzuweisen, dass die entsprechenden Erkenntnisse es (Lehrkräften) ermöglichen, Schüler:innen darin zu unterstützen, den Weg zurück in einen produktiven Lernverlauf zu finden.

Die weiterführende Analyse u.a. unter Berücksichtigung bisher nicht ausgewerteter Daten sowie die Untersuchung, wie die gewonnenen Erkenntnisse zur Individualisierung des Lehrens und Lernens in der Unterrichtspraxis genutzt werden können, sollen Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein.

1. Zielerreichung und Umsetzung der Meilensteine

Ziel des Projekts ALICE war, zu untersuchen, inwieweit die bei der Arbeit mit digitalen Technologien im mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht anfallenden Prozess- und Produktdaten genutzt werden können, um das Lernen der Schüler:innen zu erfassen, ihre Lernverläufe zu rekonstruieren und vorherzusagen, inwieweit diese Lernverläufe im Hinblick auf die Entwicklung von Kompetenz langfristig produktiv oder unproduktiv sind. Dazu sollte auf Basis eines Modells forschend-entdeckenden Unterrichts für die vier Fächer Mathematik, Biologie, Chemie und Physik jeweils eine digital gestützte Unterrichtseinheit im Umfang von ca. 20 Unterrichtsstunden entwickelt werden. Die Einheiten sollten durch ein digitales

Arbeitsbuch begleitet werden, über das mit Hilfe verschiedener digitaler Technologien die Arbeitsergebnisse der Schüler:innen (Produkte) und deren Entstehung (Prozesse) erfasst werden sollten. Zur Erprobung der Einheiten sollten diese in ca. 20 Klassen zu je 25 Schüler:innen eingesetzt und die erhobenen Daten im Hinblick auf die o.g. Zielsetzung mit Verfahren des maschinellen Lernens ausgewertet werden. Das entsprechende Arbeitsprogramm gliederte sich laut Antrag in die Arbeitsbereiche 1) Lernen in Mathematik und den Naturwissenschaften, 2) Lernen mit digitalen Medien, 3) Lernen analysieren und 4) Lernen und Lehren. Die Arbeiten im Projekt konnten aufgrund einer (bedingt durch die Corona-Pandemie) längeren Vorlaufzeit zwischen Bewilligung, Ausschreibung und Besetzung der Stellen erst mit dem 1. April 2021 aufgenommen werden. Dennoch konnten die Arbeiten unter anderem durch eine kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2024 in den ersten drei Arbeitsbereichen vollständig und im vierten weitgehend abgeschlossen werden. Im ersten Arbeitsbereich wurde, wie geplant, zunächst ein Modell digital gestützten mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts entwickelt (AP1.1). Auf dieser Basis wurden ebenfalls wie geplant vier Unterrichtseinheiten (im Umfang von 18-20 Unterrichtsstunden) zu den Themen Ableitung (Mathematik), Evolution (Biologie), Reaktionsmechanismen (Chemie) und Energiewende (Physik) entwickelt (AP1.2). Die Datenerhebung wurde aufgrund der zeitlichen Platzierung der adressierten Themen im schleswig-holsteinischen Curriculum erst mit dem Schuljahr 2022/2023 abgeschlossen. In Arbeitsbereich 2 wurde die digitale Lehr-Lern-Plattform aufgesetzt (AP2.1), die die Unterrichtseinheiten begleitenden Arbeitsbücher erstellt (AP2.2) und die teilnehmenden Lehrkräfte im Einsatz der Unterrichtseinheiten und Arbeitsbücher geschult (AP3.2).

Arbeitsbereich 3 umfasste die Bereitstellung eines Systems zur Datenaufzeichnung und -speicherung sowie zur Extraktion der Daten (AP3.1). Die Annotation der Daten und in der Folge das Training der Detektoren gestaltete sich deutlich aufwändiger als ursprünglich erwartet, konnte jedoch für die Produktdaten bis zum Ende der Projektlaufzeit abgeschlossen werden (AP3.2). Daten die aktuell noch nicht annotiert und ausgewertet wurden (u.a. umfangreiche Prozessdaten) wurden archiviert und sollen in weiterführenden Vorhaben analysiert werden (siehe Abschnitt 8). Dennoch konnten erste Analysen der Lernverläufe abgeschlossen und zur Publikation eingereicht bzw. teilweise bereits publiziert werden (AP3.3). Ähnliches gilt für die Analyse der Produktivität der Lernverläufe (AP4.1) in Arbeitsbereich 4. Damit konnten zu allen drei Fragestellungen des Projekts substanzielle Erkenntnisse gewonnen werden. Zur Entwicklung instruktionaler Strategien (AP4.2) reichen diese Erkenntnisse bisher aber nicht aus. Hier sind weitere Arbeiten zur tiefergehenden Analyse der erhobenen Daten sowie in der Folge auch zur Entwicklung und Erforschung instruktionaler Strategien geplant (siehe Abschnitt 8). Sowohl mit den umfangreichen im Rahmen des Projekts ALICE gewonnenen Daten als auch mit der zwischen den Beteiligten Projektpartner:innen aufgebauten Kooperationsstrukturen wurde dafür eine solide Basis gelegt.

Auch die Mittelverwendung erfolgte im Wesentlichen nach Plan. Mittel, die ursprünglich für Workshops mit den internationalen Kooperationspartner:innen vorgesehen waren, konnten pandemiebedingt nicht genutzt werden und wurden stattdessen zur Deckung von im Rahmen der Erhebungen anfallenden Sachkosten (z.B. Materialkosten) verwendet. Darüber hinaus wurde am IWM zunächst ein Postdoc eingestellt. Die anfallenden Mehrkosten wurden bis zum Projektende aber darüber kompensiert, dass die entsprechende Person vorzeitig aus dem Projekt ausschied. Die Arbeiten wurden durch eine kurzfristig eingestellte wissenschaftliche Mitarbeiterin abgeschlossen.

2. Aktivitäten und Hindernisse

Das Projekt wurde im April 2021 mit einem (pandemiebedingt) virtuellen Kick-off-Meeting der Teams der vier Projektpartner:innen sowie der internationalen Kooperationspartner begonnen. In diesem Rahmen wurden die Projektziele verifiziert und der Arbeitsplan für das erste Projektjahr konkretisiert. Insbesondere wurden grundlegende Aspekte des Unterrichtsmodells festgelegt. Dieses wurde in der Folge unter Führung des IPN weiter ausgearbeitet, publiziert und wird bereits sehr gut rezipiert. In der Folge wurden die Unterrichtseinheiten entwickelt. Mit Hilfe der am DIPF entwickelten Methode FoLA (<http://fola.digital>) wurden Vorlagen für die Implementation der digitalen Technologien im digitalen Arbeitsbuch entwickelt. Diese über die Fächer hinweg standardisierten Vorlagen spezifizieren einerseits, welche digitalen Technologien zur Unterstützung des Lernens eingesetzt werden und welche Prozess- und Produktdaten in Folge des Einsatzes dieser digitalen Technologien erfasst werden. Mit Hilfe der Vorlagen wurde zu jeder Unterrichtseinheit ein digitales Arbeitsbuch erstellt. Die Unterrichtseinheiten und begleitenden Arbeitsbücher wurden im Frühjahr 2022 pilotiert. Parallel wurden Erhebungsdesign und Instrumente erarbeitet und beim jährlichen Projekttreffen im April 2022 in Kiel finalisiert. Im Anschluss begann die Vorbereitung der Datenerhebung. Dazu wurden zunächst die Unterrichtseinheiten auf Basis der Pilotierungsergebnisse überarbeitet. Parallel wurde die Fortbildung der teilnehmenden Lehrkräfte geplant und die Stichproben rekrutiert. Als Hindernisse bei der Stichprobenrekrutierung ergaben sich neben einer pandemiebedingt reduzierten Bereitschaft der Lehrkräfte, an einer wissenschaftlichen Untersuchung mitzuwirken, vor allem auch eine

von den Lehrkräften als einen potenziell zusätzlichen Aufwand bedeutende mangelnde technische Infrastruktur an den Schulen (z.B. fehlende Ausstattung mit digitalen Endgeräten in Klassenstärke oder nicht in ausreichender Bandbreite vorhandener Internetzugang). Diesem Hindernis konnte teilweise durch Bereitstellung entsprechender Infrastruktur (z.B. mobilem Internetzugang, Klassensätze digitaler Endgeräte) begegnet werden.

Die Datenerhebung begann mit der Fortbildung der ersten Lehrkräfte Anfang des Schuljahres 2022/2023. Sie wurde mit dem Ende des Schuljahres 2022/2023 abgeschlossen. In Mathematik und Physik wurde darüber hinaus eine zweite Datenerhebung im Schuljahr 2023/2024 durchgeführt. Insgesamt konnten Daten von 14 Klassen und 252 Schüler:innen in Biologie, 19 Klassen und 318 Schüler:innen in Chemie, 15 Klassen und 365 Schüler:innen in Mathematik, und 25 Klassen und 548 Schüler:innen in Physik erhoben werden. Um die zu Beginn des Projekts entstandenen Verzögerungen zu kompensieren, wurde bereits im Frühjahr 2023 mit der Datenauswertung begonnen. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen eines Workshops zunächst die Prozesse zur Datenaufbereitung und -analyse abgestimmt. Dies betraf insbesondere die Vorgehensweise zur Annotation der Daten. Als ein zentrales Hindernis stellte sich dabei der hohe Bedarf an studentischen Hilfskräften heraus, die darüber hinaus intensiv trainiert werden mussten, um qualitativ hochwertige Annotationen sicherzustellen. So gelang es nur mit Mühe ausreichend Hilfskräfte in allen Fächern zu rekrutieren und nach dem Training längerfristig im Projekt zu halten. Dies lag unter anderem darin begründet, dass Lehramtsstudent:innen der beteiligten Fächer häufig für eine bessere Bezahlung als Aushilfslehrkraft tätig werden. Dennoch konnten die zentralen Daten (Produktdaten) bis zum Ende des Projekts im Dezember 2024 vollständig annotiert und in der Folge auch weitgehend ausgewertet werden. Die bisher nicht ausgewerteten Daten sollen in Folgeprojekten analysiert werden (s. Abschnitt 8). Die gewonnenen Ergebnisse wurden im Rahmen eines Abschlussworkshops im Dezember 2024 gemeinsam mit den internationalen Kooperationspartnern diskutiert und Fragestellungen für weiterführende Projekte identifiziert.

3. Ergebnisse und Erfolge

Im Projekt ALICE sollten drei übergeordnete Fragestellungen bearbeitet werden. Die erste Fragestellung zielte darauf wie es gelingen kann aus unterschiedliche Daten, die beim Lernen mit digitalen Technologien entstehen, Rückschlüsse über das Lernen der Schüler:innen zu ermöglichen. Im Rahmen des Projekts konnte gezeigt werden, dass die Kombination aus domänenspezifischem Modell des Lehrens und Lernens, dem FoLA Design-Methode (<http://foia.digital>) und *evidence-centered design* (ECD) einen strukturierten Rahmen bietet, um Lernaktivitäten so zu gestalten, dass sie sowohl produkt- als auch prozessbezogene Daten erzeugen, die sich zur Analyse des Lernens und der Lernverläufe von Schüler:innen eignen. Ein domänenspezifisches Modell des Lehrens und Lernens bildet den geeigneten Rahmen für die Implementation kohärenter Lernaktivitäten (d.h. Lernaktivitäten, die im Hinblick auf Kompetenzentwicklung systematisch aufeinander aufbauen). Die FoLA-Design-Methode unterstützt die Identifikation digitaler Technologien, die die Lernaktivitäten unterstützen (und der Daten, die in diesem Rahmen generiert werden können). Das ECD verknüpft die Ziele der Lernaktivitäten (und wesentliche Zwischenschritte in deren Erreichung) mit den Daten. Das entwickelte Design Framework konnte erfolgreich in einer editierten Sammlung zum Einsatz Künstlicher Intelligenz beim Lehren und Lernen in MINT publiziert werden.

Die zweite Fragestellung lautete: Inwieweit lässt sich die Produktivität der Lernverläufe der Schüler:innen in Hinblick auf ihre Kompetenzentwicklung vorhersagen? Zur Bearbeitung der Fragestellung wurden im Rahmen des Projekts vier Strategien exploriert, um Lernverläufe zu charakterisieren und zu Kompetenzentwicklung in Beziehung zu setzen. Diese hatten zum Ziel, sowohl fachspezifische als auch fächerübergreifende Lernverläufe zu identifizieren: 1) Identifikation und datenbasierte Vorhersage von Gruppen von Schüler:innen mit ähnlichen Lernverläufen, 2) Identifikation von Gruppierungen mit ähnlicher Lernleistung über die Zeit, 3) Analyse von Wissensnetzwerken, basierend auf Lernleistung oder Concept-Maps, 4) Vorhersage des Lernerfolgs am Ende der Lerneinheiten und Identifikation von relevanten Charakteristika. Im Rahmen dieser Strategien wurden unterschiedliche Daten herangezogen wie z.B. allgemeine kognitive Fertigkeiten oder fachspezifisches Vorwissen, Daten aus dem Lernprozess (Bearbeitung von Aufgaben), oder Selbstberichte zum Erleben der Lernprozesse, etwa über epistemische Emotionen oder situationales Interesse, sowie Wissens Elemente und Fertigkeiten, die sich in der Bearbeitung der Aufgaben dokumentieren. Für jedes Fach konnten auf diese Weise wichtige Einblicke zum Zusammenhang von Lernverläufen und Kompetenzentwicklung gewonnen werden. Insbesondere zeigte sich, dass in jedem Fach andere Lernverläufe (erfasst über die einzelnen Lernaktivitäten) mit Kompetenzentwicklung (gemessen über Leistungstests am Anfang und am Ende der Unterrichtseinheiten) assoziiert waren. Dies bestätigt noch einmal die Bedeutung eines fachspezifischen Zugangs bei der Analyse von Lernen bzw. Lernverläufen. Als für die Vorhersage der Kompetenzentwicklung besonders zentral erwiesen sich neben allgemeinen kognitiven Fertigkeiten, das fachspezifische Vorwissen (z.B. in Physik, Biologie und Mathematik), und fachbezogene Selbst-

konzept (in Biologie), fachspezifisches Interesse (Mathematik) oder Erfahrungen während des Lernprozesses, etwa Gefühle von Verwirrung (in Biologie und Physik). Nicht zuletzt konnten fachspezifische Merkmale des Lernens (z.B. ein stark vernetztes Wissen rund um die Idee elektrischer Energie im Fach Physik, oder die Bedeutung der Internalisierungsphase beim Erwerb von Wissen zum Differenzialquotienten in Mathematik) als bedeutsam für die Vorhersage der Kompetenzentwicklung identifiziert werden. Wichtig anzumerken ist, dass in den verschiedenen Fächern stellenweise unterschiedliche Merkmale besonders hohe Voraussagekraft hatten. Während Variablen wie fachspezifisches Vorwissen, allgemeine kognitive Fertigkeiten, der Grad der Verknüpfung von Wissensselementen, sowie Freude während der Lernzeit fächerübergreifend eine hohe Voraussagekraft aufwiesen, verwiesen die Analysen auf Ebene der einzelnen Fächer auf den Umstand, dass Lernverläufe fachspezifischen Bedingungen unterliegen. Darüber hinaus konnte der Lernerfolg anhand der herangezogenen Daten mithilfe von maschinellem Lernen in einigen Fällen sehr früh vorhergesagt werden. Dieser Befund bestätigt, dass Schüler:innen die vor Herausforderungen stehen frühzeitig identifiziert werden können, um ihnen spezifische Unterstützung zukommen zu lassen.

Die dritte Fragestellung hob darauf ab, zu erkunden, inwieweit sich anhand von Merkmalen unproduktiver Lernverläufe die zugrundeliegenden Ursachen für diese Unproduktivität identifizieren lassen. Die Analysen der Lernverläufe heben hervor, dass es fächerübergreifende und fachspezifische Merkmale gibt, die mit unterschiedlicher Kompetenzentwicklung assoziiert sind. Während die Gestaltung der Datenerhebung und die Analysen keine kausalen Schlüsse über Gründe für produktivere Lernverläufe erlauben, sind die identifizierten Merkmale vor dem Hintergrund einschlägiger pädagogisch-psychologischer Lerntheorien und Erkenntnissen zum fachspezifischen Lehren und Lernen plausibel. So ist die zentrale Bedeutung allgemeiner kognitiven Fertigkeiten und fachspezifischem Vorwissen für den Erwerb neuen Wissens empirisch gut belegt. Andere Ursachen für erfolgreiche, bzw. weniger erfolgreiche Lernverläufe finden sich allerdings auch in der Rolle bestimmter Wissensselemente und im Grad ihrer Vernetzung mit anderen Wissensselementen. Dies verweist auf die Bedeutung der Integration verschiedener Wissensselemente für den Kompetenzerwerb. Nicht zuletzt unterstreichen die Projektergebnisse die Rolle von Zuständen während des Lernprozesses, allen voran der Emotionen beim Lernen, wie Neugier, Freude, Verwirrung oder Frustration. Die Erkenntnisse zu fachspezifischen Merkmalen des Lernens liefern darüber hinaus wichtige Erkenntnisse sowohl für die Weiterentwicklung fachspezifischer Modelle des Lehrens und Lernens als auch für die Optimierung (im Sinne einer Individualisierung des Unterrichts).

Die Befunde konnten auf zahlreichen nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt werden. International ist dabei ein Symposium auf der NARST 2024 hervorzuheben, national ein Symposium zu "KI zur Förderung und Analyse von Lehr- und Lernprozessen" auf der GEBF 2025. Darüber hinaus konnten eine Reihe dieser Ergebnisse bereits erfolgreich publiziert werden oder sind zur Publikation eingereicht. So wurde u.a. ein Beitrag in der Zeitschrift *Physical Review Physics Education Research* publiziert und ein Beitrag zu einem Special Issue "AI in Science Education" des DISER eingeladen.

4. Chancengleichheit, Karriereförderung und Internationalisierung

Zur Förderung der Chancengleichheit wurden bei der Stellenbesetzung Frauen und Personen mit internationalem Hintergrund gezielt angesprochen. Die Promotionsstellen am IPN konnten zunächst paritätisch besetzt werden. Unüblich für die (fachbezogene) Bildungsforschung konnte auch eine Person mit internationalem Hintergrund gewonnen werden, die sich in der Folge jedoch beruflich umorientiert hat. Da eine schnelle Nachbesetzung nötig war, um den Projektfortschritt nicht zu gefährden, ließ sich die Geschlechterparität am IPN nicht aufrechterhalten. Die Stelle am DIPF konnte wegen der im Bereich Informatik vorherrschenden Geschlechterverteilung nicht mit einer Frau besetzt werden. Die Stelle an der RUB wurde mit einer Frau besetzt. Die Arbeiten am IWM wurden aufgrund mangelnder Erfolgsaussichten zum Projektbeginn, eine Bewerberin zu finden, von einem Postdoktoranden übernommen. Nach dessen Ausscheiden konnte eine Frau für den Abschluss der Arbeiten gewonnen werden. Auf Ebene der studentischen Mitarbeitenden konnten die Stellen überwiegend mit Frauen besetzt werden.

Die Karriereförderung erfolgte wie vorgesehen durch die jeweiligen Strategien der beteiligten Partner:innen (vgl. Antrag). Insbesondere hatten die Mitarbeiter:innen Zugang zu vielfältigen Qualifizierungsangeboten im Rahmen der Graduiertenprogramme der beteiligten Partner:innen (z.B. die IPN-Graduiertenschule), sowie außerdem projektinterner Workshops (z.B. Annotationstool Inception). Darüber hinaus wurden die Mitarbeiter:innen individuell durch die (Teil-)Projektleitungen und durch regelmäßige institutionelle Supervisionsangebote seitens der Partner:innen (z.B. IPN-Mentoringprogramm) unterstützt. Nicht zuletzt haben die Mitarbeiter:innen ihre Forschungsvorhaben regelmäßig im Rahmen einschlägiger nationaler und internationaler Fachkonferenzen (siehe auch 2. Aktivitäten und Hindernisse) vorgestellt und Rückmeldungen der wissenschaftlichen Fachcommunity zu erhalten. Zudem hatten die Mitarbeiter:innen die Möglichkeit zu einem voll finanzierten Auslandsaufenthalt von bis zu drei Monaten. In diesem Rahmen wurden u.a. Auslandsaufenthalte bei Prof. Dr. Erin M. Furtak, University of Colorado Boulder und Prof. Dr. Martina Rau,

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich absolviert. Eine Mitarbeiterin, die ihre Dissertation bereits erfolgreich abgeschlossen hat, hat inzwischen eine Postdoktorandinnenstelle angetreten.

Im Bereich der Internationalisierung wurde neben den ohnehin beteiligten internationalen Kooperationspartner:innen ein enger Austausch mit den Netzwerken der Projektbeteiligten gepflegt. Dies schließt u.a. ausgewiesene Forscher:innen in den USA (u.a. Prof. Dr. Xiaoming Zhai, University of Georgia) oder Brasilien (u.a. Prof. Dr. Isabela Gasparini, Santa Catarina State University).

5. Strukturen und Kooperationen

Die Koordination der Zusammenarbeit der beteiligten Projektpartner:innen, die Planung der einzelnen Arbeitsschritte und die Kontrolle des Arbeitsfortschritts erfolgte durch regelmäßige (virtuellen) Teamsitzungen, Projektleitungstreffen und Projekttreffen. Die Teamsitzungen fanden zweiwöchentlich in Zoom statt, die Projektleitungstreffen nach Bedarf auf Einladung der Projektkoordination, mindestens jedoch halbjährlich, die Projekttreffen einmal im Jahr. Nach Bedarf wurden Treffen in kleineren Gruppen sowie Workshops zur Zusammenführung getrennt erzielter Arbeitsergebnisse durchgeführt. Die Ergebnisse der Teamsitzungen, Projektleitungs- und Projekttreffen wurden für alle Beteiligten einsehbar verbindlich protokolliert. Die Teamsitzungen, Projektleitungs- und Projekttreffen wurden einberufen, vorbereitet und geleitet durch die am IPN verortete Projektkoordination. Diese stellte auch die digitale Infrastruktur für die Zusammenarbeit bereit; darunter die Software für virtuelle Treffen, gesicherten Cloudspace sowie eine Projektmanagementsoftware zum Monitoring des Arbeitsfortschritts und dem Erreichen der vorgesehenen Meilensteine.

6. Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung wurde durch konsequente Orientierung an den Prinzipien guter wissenschaftlicher Praxis gewährleistet. Die schloss die transparente und nachvollziehbare Dokumentation der Forschungsschritte, regelmäßige Begutachtungen der Zwischenstände sowie den Einsatz etablierter Methoden zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ein. Ein zentrales Produkt des Projekts ist ein sehr umfangreicher Datensatz, der u.a. einen großen kodierten Freitext-Datensatz enthält. Die Erhebung und Verarbeitung der Daten erfolgte unter Berücksichtigung ethischer und datenschutzrechtlicher Vorgaben. Die Ethikkommission des IPN hat dem Forschungsdesign zugestimmt, und die zuständigen Ministerien haben die Studien der verschiedenen Fächer bewilligt. Die bisher erzielten Erkenntnisse wurden zu einem großen Teil bereits als Open Access publiziert. Weitere Open Access Publikationen sind in Planung. Darüber hinaus ist die Veröffentlichung des Datensatzes geplant, um eine weitergehende Nutzung in der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu ermöglichen. Im Rahmen des Projekts wurden keine Tierversuche durchgeführt.

7. Zusätzliche Ressourcen

Die erbrachten „In-kind“ Leistungen umfassten antragsgemäß Mittel im Umfang von zwei Promotionsstellen (E13, 75%) sowie Aufstockung der beiden aus dem Antrag finanzierten Stellen (auf E13, 75%) von Seiten des IPN; wobei die Mittel aus dem Antrag und die erbrachten „In-kind“ Leistungen gleichmäßig über die beteiligten vier Abteilungen hinweg aufgeteilt wurden. Der der Abteilung für Didaktik der Mathematik aus dem Antrag zustehende Stellenanteil wurde zur Refinanzierung eines Postdocs verwendet.

8. Ausblick

Mit dem Projekt ALICE wurde das Forschungsfeld „Learning Progression Analytics“ erschlossen. Insbesondere konnten theoretisch und methodisch fundiert umfangreiche Produkt- und Prozessdaten gewonnen werden; außerdem konnte nachgewiesen werden, dass diese zur Vorhersage produktiver und unproduktiver Lernverläufe genutzt werden können. Die nächsten logischen Schritte sind die weitere Auswertung der umfangreichen (Prozess-)daten. Dazu sollen im Rahmen der aufgebauten Kooperationsstrukturen gezielt Forschungsanträge z.B. bei der DFG zu einzelnen Fragestellungen gestellt werden. Darüber hinaus ist mittelfristig ein wichtiger nächster Schritt die Frage, wie die gewonnenen Erkenntnisse zur Individualisierung des unterrichtlichen Lehrens und Lernens in der Praxis genutzt werden können. Hier sind ebenfalls weiterführende Antragstellungen der Kooperationspartner:innen z.B. im Rahmen des Leibniz-Wettbewerbs geplant. Zur Vorbereitung dieser Antragstellungen ist im Jahr 2025 ein gemeinsamer Workshop vorgesehen.

Titel des Vorhabens: Learning Progression Analytics – Analyzing Learning for Individualized Competence development in Mathematics and Science Education (ALICE)

Projektnummer/Aktenzeichen: K365

Die Befunde der letzten PISA-Studien belegen die Notwendigkeit für eine stärkere Individualisierung des Lehrens und Lernens in Mathematik und den Naturwissenschaften. Zugleich fehlt es Lehrkräften häufig an Einsicht in die Lernverläufe einzelner Schüler:innen. Digitale Technologien bieten eine Lösung: Die bei der Arbeit mit diesen Technologien anfallenden Daten tragen Informationen über das Lernen der Schüler:innen. Bisher war jedoch weitgehend unklar, wie aus den umfangreichen und z.T. sehr unterschiedlichen Daten Rückschlüsse über das Lernen gezogen werden können. Ziel des Projekts „Analyzing Learning for Individualized Competence Development in Mathematics and Science Education“ (ALICE) war daher, zu untersuchen, inwieweit sich die beim Einsatz digitaler Technologien im mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht anfallenden Prozess- und Produktdaten nutzen lassen, um das Lernen der Schülerinnen und Schüler (SuS) zu erfassen, Lernverläufe zu rekonstruieren und vorherzusagen, inwieweit diese Lernverläufe im Hinblick auf die (langfristige) Entwicklung von Kompetenz produktiv oder unproduktiv sind. Damit sollten die Grundlagen für eine stärkere Individualisierung des Lehrens und Lernens in Mathematik und den Naturwissenschaften gelegt werden. Das Projekt kombiniert damit innovative Grundlagenforschung mit hoher Anwendungsrelevanz, erfordert jedoch Expertise aus unterschiedlichen Bereichen der allgemeinen und fachbezogenen Lehr-Lernforschung sowie Learning Analytics. Im Projekt sollte daher eine Kooperation zwischen IPN, IWM, DIPF und Ruhr-Universität Bochum sowie den internationalen Kooperationspartnern aufgebaut werden, mit dem Ziel, komplementäre Expertise aus den genannten Bereichen zusammenzubringen, um das neue Forschungsfeld der (so genannten) Learning Progression Analytics zu erschließen und die den komplexen Herausforderungen bei der Erschließung dieses Forschungsfelds zu begegnen.

Die erzielten Ergebnisse sind mit Blick auf die weitere Entwicklung des Forschungsfelds vielversprechend. So ist es durch die Kombination eines domänenspezifischen Modells des Lehrens und Lernens, mit Designverfahren aus dem Bereich Learning Analytics, und dem *evidence-centered design* gelungen, ein strukturiertes Verfahren zu entwickeln, um Lernaktivitäten zu entwickeln, die sowohl produkt- als auch prozessbezogene Daten erzeugen, die sich zur Analyse des Lernens und der Lernverläufe von Schüler:innen eignen. Im nächsten Schritt ist es gelungen für je eine Unterrichtseinheit in Mathematik und den drei naturwissenschaftlichen Fächern Daten von insgesamt über 1483 Schüler:innen zu erheben; und zwar sowohl umfangreiche Produkt- als auch detaillierte Prozessdaten. Dieser Datensatz ist in seiner Form so einzigartig und soll nach Abschluss weiterer Analysen der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Im Rahmen des Projekts konnte außerdem gezeigt werden, dass es bereits anhand ausgewählter Produktdaten möglich ist, Lernverläufe zu rekonstruieren, produktive und unproduktive Lernverläufe zu trennen und insbesondere auch fachspezifische Merkmale (z.B. spezifisches Wissen) zu identifizieren, die charakteristisch für unproduktive Lernverläufe sind. Die Ergebnisse belegen damit das besondere Potential des Forschungsfelds Learning Progression Analytics. Dieses Potential soll in weiterführenden Analysen ausgeschöpft werden. Die aufgebauten Kooperationsstrukturen bilden dafür eine hervorragende Grundlage.

Als Herausforderung hat sich bisher zum einen die Auswertung der Prozessdaten erwiesen. Die Auswertung dieser Daten erfordert scheinbar die Integration allgemeiner Theorien des Lehrens und Lernens, da diese anders als die domänenspezifischen Modelle, den kleineren Zeitskalen auf denen Prozessdaten angesiedelt sind, eher gerecht werden. Die Integration dieser Theorien in das entwickelte Verfahren war im Projekt aus Zeitgründen nicht vorher möglich. Dies soll in einem nächsten Schritt geschehen. Als zweite nennenswerte Herausforderung hat sich die Kodierung der Daten durch menschliche Kodierer als Voraussetzung für das maschinelle Lernen erwiesen, d.h. das Anlernen von Algorithmen, die die Kodierung des Lernens bzw. die Rekonstruktion und Analyse von Lernverläufen automatisieren. In einem alternativen Zugang wurde exploriert, inwieweit generative künstliche Intelligenz insbesondere *large language models* die umfangreiche Kodierung durch menschliche Kodierer überflüssig machen können. Erste Ergebnisse sind vielversprechend zeigen aber noch weiteren Optimierungsbedarf.

Insgesamt konnte sowohl der Kosten- als auch der Zeitplan eingehalten werden (vgl. Abschlussbericht, Abschnitt 1 u. 7). Zu Projektbeginn ergaben sich, hauptsächlich bedingt durch die Covid19-Pandemie, Verzögerungen. Diese konnten jedoch bis auf ein Arbeitspaket, das ohnehin tentativ vorgesehen war, im Projektverlauf aufgeholt werden. Nächste Schritte im Projekt sind einerseits die weiterführenden Analysen der umfangreichen Daten mit dem Ziel die Erfassung des Lernens, die Rekonstruktion von Lernverläufen und insbesondere die Vorhersage der Kompetenzentwicklung, sowie die Ursachen fehlender Kompetenzentwicklung zu detektieren. Dazu ist die gemeinsame Beantragung weiterer Mittel im Rahmen der etablierten Kooperationen geplant. Darüber hinaus soll das im Projekt entwickelte strukturierte Verfahren zur Entwicklung von Lernaktivitäten weiterentwickelt und mit Blick auf den zunehmenden Einsatz digitaler Technologien und der Notwendigkeit eines stärker individualisierten Unterrichts in die Praxis transferiert werden. Dazu wurde bereits ein Antrag im Rahmen des Leibniz-Wettbewerbs (Transfer) eingereicht.