



Doctoral Thesis

## **Problem-Solving Followed by Instruction: State-of-the-Art and New Directions**

**Author(s):**

Sinha, Tanmay

**Publication Date:**

2020

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000460745> →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 27130

***PROBLEM-SOLVING FOLLOWED BY INSTRUCTION:  
STATE-OF-THE-ART AND NEW DIRECTIONS***

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**TANMAY SINHA**

*M.S. Computer Science, Carnegie Mellon University*

born on 21.11.1992

citizen of India

*Prof. Dr. Manu Kapur, Examiner  
Prof. Dr. Elsbeth Stern, Co-examiner  
Prof. Dr. Eleni Kyza, Co-examiner  
Prof. Dr. Catherine Chase, Co-examiner*

2020

## Abstract

This thesis makes *three inter-related contributions* pertinent to problem-solving followed by instruction (PS-I), a learning design with high potential to influence students' conceptual understanding and transfer.

The *first contribution* aims at expanding the field meta-analytically by investigating factors affecting PS-I efficacy, relative to other widely practiced learning designs such as instruction followed by problem-solving (I-PS), scaffolded problem-solving followed by instruction (+PS-I), and alternative preparatory activity (e.g., worked example, problem-posing) followed by instruction (!PS-I). This strand of research is *motivated* by the fact that on the one hand, immense variability exists in PS-I implementations over the years, while on the other hand, attempts to synthesize this body of work are mostly qualitative in nature. The conducted meta-analyses therefore fill the *research gap* of identifying conditions under which preparatory problem-solving effects are best fostered. *Results* suggest a significant differential advantage of PS-I over I-PS, with additive effects when PS-I is implemented with high fidelity to the design principles of Productive Failure (PF). The learning advantage of PS-I still holds relative to !PS-I (albeit marginally significantly, and with partially additive effects for PF fidelity). However, existing work on scaffolding preparatory problem-solving (primarily towards problem-solving success) has no added learning benefits.

The *second contribution*, via a classroom and follow-up lab study, therefore aims at experimentally investigating deliberate, guided failure as a novel scaffolding strategy within PS-I. This strand of research is *motivated* by the fact that within PS-I, there is a growing body of research on (i) unsuccessful attempts to explicitly scaffold problem-solving towards success (e.g., via cognitive and/or metacognitive support), and, (ii) mixed attempts to increase failure-likelihood by leaving preparatory problem-solving unscaffolded (that is, by not providing any explicit scaffolds). Creating failure opportunities in a learning design, however, does not automatically imply that students actually experience failure. The conducted experimental studies therefore fill the *research gap* of explicitly scaffolding preparatory problem-solving towards failure and examining its differential impact on learning. *Results* based on posttest scores and quality of student reasoning suggest that nudging students towards suboptimal solutions (via explicit failure-driven scaffolds) may lead to stronger conceptual understanding and the ability to transfer than nudging students towards more optimal solutions (via explicit success-driven scaffolds). Additionally, students exposed to both forms of scaffolding perform better than students who receive no explicit scaffolding during the problem-solving phase.

The *third contribution* aims at expanding the explanatory basis of PS-I using process (and several retrospective) measures. This strand of research is *motivated* by the fact that despite growing work on certain retrospectively-administered measures (e.g., knowledge gap awareness, state curiosity) explaining differential advantages of PS-I across multiple studies, their impact altogether has not been thus far examined within a single study context. Mechanisms such as cognitive dissonance and metacognitive calibration, which are pertinent to the presence of scaffolding, have not yet been explored. Further, former educational psychology work on process measures of affect is limited to I-PS and/or guided discovery style contexts, with learning outcomes assessed independent of formal classroom instruction. The conducted multimodal learning analyses foregrounding the mechanisms of PS-I therefore fill the *research gap* of assessing fine-grained temporal dynamics of cognition and affect, and triangulating these dynamics with several retrospectively-administered measures. *Results* suggest abundance of unconventional negative emotions like shame, anger, disgust and contempt that differentially impact learning, and corroborate previously established work on the presence and positive influence of positive emotions like surprise, interest and happiness in generative problem-solving. The emotional roller-coaster ride experienced by students in preparatory problem-solving drives learning benefits.

Taken together, the interdisciplinary contributions of this thesis advance state of the art in Educational Psychology, Learning Sciences and Affective Computing by the design of (and investigation of mechanisms underlying) failure-driven and success-driven pedagogy in PS-I.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Doktorarbeit umfasst drei zusammenhängende Beiträge, die das Lerndesign problem-solving followed by instruction (PS-I, „Übung vor Instruktion“) untersuchen. Dieses Design verfügt über ein hohes Potential, das konzeptionelle Verständnis von Lernenden sowie deren Fähigkeit, das Gelernte zu transferieren, positiv zu beeinflussen.

*Der erste Beitrag* dieser Arbeit zielt darauf ab, das Forschungsfeld zu PS-I Lerndesigns durch eine Meta-Analyse zu ergänzen. Dabei wird untersucht, welche Faktoren die Wirksamkeit von PS-I Designs im Vergleich zu anderen weit verbreiteten Lerndesigns wie instruction followed by problem-solving (I-PS, „Instruktion vor Übungen“), scaffolded problem-solving followed by instruction (+PS-I, „Übungen mit Scaffolding vor Instruktion“) sowie anderen vorbereitenden Aktivitäten wie worked examples („ausgearbeitete Lösungsbeispiele“) oder problem-posing („Formulieren von Problemstellungen“) gefolgt von Instruktion (!PS-I) beeinflussen. Über die Jahre wurde in der Forschung zu PS-I Designs eine grosse Bandbreite unterschiedlicher Implementationen dieses Ansatzes untersucht. Arbeiten, welche die unterschiedlichen Ansätze zusammenfassen, waren bis jetzt überwiegend qualitativer Natur. Die hier durchgeführte Meta-Analyse schliesst die Forschungslücke zur Identifikation von Bedingungen, unter welchen die (positiven) Effekte von vorbereitenden Übungen am besten erzielt werden können. Die Resultate zeigen einen signifikanten Vorteil von PS-I gegenüber I-PS Designs. Der Effekt tritt verstärkt auf, wenn PS-I Designs in hoher Übereinstimmung mit den Prinzipien von productive failure (PF, „Produktives Scheitern“) implementiert werden. Der Lernvorteil von PS-I zeigt sich auch relativ zu !PS-I, wobei sich auch hier ein Einfluss der Einhaltung von Designprinzipien für productive failure zeigt. Es kann kein zusätzlicher Vorteil von (meist erfolgsorientiertem) Scaffolding in vorbereitenden Übungen von PS-I Designs gefunden werden.

*Der zweite Beitrag*, bestehend aus einer Feldstudie und einer darauf basierenden Laborstudie, zielt daher darauf ab, absichtlich herbeigeführtes Scheitern als neuartige Scaffolding-Strategie innerhalb von PS-I experimentell zu untersuchen. Dieser Forschungszweig wird durch die Tatsache motiviert, dass es innerhalb von PS-I eine steigende Zahl von Studien zu folgenden Themen gibt: (i) Versuche, die Lernenden beim Lösen der vorbereitenden Übungen in Richtung Erfolg zu unterstützen (beispielsweise mittels kognitiver und/oder metakognitiver Strategien), und (ii) Versuche, die Wahrscheinlichkeit des Scheiterns zu erhöhen, indem die vorbereitenden Übungen keine expliziten Scaffolds beinhalten. Der Einbau von Möglichkeiten zum Scheitern in einem Lerndesign bedeutet jedoch nicht automatisch, dass die Lernenden auch tatsächlich scheitern. Die durchgeführten experimentellen Studien schliessen daher die Forschungslücke in Bezug auf explizites Scaffolding in Richtung Scheitern während der vorbereitenden Übungen und dessen Auswirkungen auf das Lernen. Die Ergebnisse, welche auf Posttest-Resultaten und der Qualität der Argumentation von Studierenden basieren legen nahe, dass das Hinführen der Lernenden zu suboptimalen Lösungen (über explizite Scaffolds in Richtung Scheitern) zu besserem konzeptionellen Verständnis und Lerntransfer führt, als das Hinführen der Lernenden zu optimaleren Lösungen (über explizite Scaffolds in Richtung Erfolg). Darüber hinaus schneiden Studierende, die beiden Formen von Scaffolding ausgesetzt sind besser ab als Studierende, die während der vorbereitenden Übungen kein explizites Scaffolding erhalten.

*Der dritte Beitrag* zielt darauf ab, die Erklärungsgrundlage von PS-I mithilfe von Prozessmessungen (und mehreren retrospektiven Messungen) zu erweitern. Dieser Ansatz wird durch die Tatsache motiviert, dass trotz einer zunehmenden Zahl von Arbeiten zu bestimmten retrospektiven Messungen (beispielsweise knowledge gap awareness, „Bewusstsein für Wissenslücken“ oder state curiosity, „Neugierde“), welche die differentiellen Vorteile von PS-I in mehreren Studien erklären, deren gleichzeitige, gemeinsame Auswirkungen bisher nicht untersucht worden sind. Des Weiteren sind Mechanismen wie kognitive Dissonanz und metakognitive Kalibrierung, die beim Einsatz von Scaffolds von Relevanz sind, in diesem Kontext noch unerforscht. Frühere Arbeiten aus der pädagogischen Psychologie zu Prozessmessungen des Affekts beschränkten sich ausserdem auf die Lerndesigns I-PS und/oder guided discovery („geführte Entdeckung“), wobei Lernergebnisse unabhängig von der Art der formalen Instruktion bewertet wurden. Die durchgeführten multimodalen Lernalysen, welche die Mechanismen von PS-I in den Vordergrund stellen, schliessen daher die Forschungslücke hinsichtlich einer zeitlich hochaufgelösten Erfassung der Dynamik von Kognition und Affekt mit gleichzeitiger Triangulation dieser Dynamik und mehreren retrospektiven Messungen. Die Ergebnisse deuten auf die Rolle einer Vielzahl negativer Emotionen wie Scham, Wut, Ekel und Verachtung hin, die sich unterschiedlich auf das Lernen auswirken, und bestätigen bereits etablierte Arbeiten zum Vorhandensein und dem positiven Einfluss positiver Emotionen wie Überraschung, Interesse und Glück beim generativen Problemlösen. Die emotionale Achterbahnfahrt, welche die Studierenden bei vorbereitendem Problemlösen erleben, trägt zu dessen Lernvorteilen bei.

Mit der Entwicklung (und der Untersuchung der Mechanismen) von misserfolgs- und erfolgsorientierten pädagogischen Designs im PS-I Format tragen die interdisziplinären Beiträge dieser Dissertation insgesamt zum Fortschritt des aktuellen Standes der Wissenschaft in den Bereichen Pädagogische Psychologie, Lernwissenschaften und Affective Computing bei.