

# Quantifying the medical student learning curve for ECG rhythm strip interpretation using deliberate practice

## Abstract

**Objectives:** Obtaining competency in medical skills such as interpretation of electrocardiograms (ECGs) requires repeated practice and feedback. Structured repeated practice and feedback for ECGs is likely not provided to most medical students, so skill development is dependent on opportunistic training during clinical rotations. Our aim was to describe:

1. the amount of deliberate practice completed for learning ECG rhythm strip diagnoses in first year medical students,
2. the learning curve for rhythm strip diagnosis, and
3. student experiences with deliberate practice.

**Methods:** First year medical students from two medical schools were provided with online rhythm strip practice cases. Diagnostic accuracy was measured throughout practice, and students were provided feedback for every case they completed. Total cases practiced and time spent practicing were correlated with their performance during practice and on an exam.

**Results:** 314 of 384 (82%) students consented. The mean number of ECGs each student practiced was 59 (range 0-280), representing 18,466 total instances of deliberate practice. We generated mathematical models that accurately correlated both the number of cases practiced and time spent practicing, with diagnostic accuracy on an exam ( $p < 0.001$ ). For example, students would need to spend on average of 112 minutes and complete 34 practice cases to obtain 75% on an ECG rhythm strip exam. Student satisfaction was high using the online cases.

**Conclusions:** We succeeded in delivering deliberate practice for ECG rhythm strip interpretation to a large cohort of students at 2 medical schools. We quantified a learning curve that estimates the number of cases and practice time required to achieve pre-determined levels of diagnostic accuracy. This data can help inform a competency-based approach to curriculum development.

**Keywords:** learning curve, Electrocardiography, Competency-Based Education, deliberate practice

Jason Waechter<sup>1</sup>  
David Reading<sup>2</sup>  
Chel Hee Lee<sup>3</sup>  
Mathieu Walker<sup>4</sup>

1 University of Calgary, Depts. of Critical Care and Anesthesiology, Calgary (Alberta), Canada

2 University of British Columbia, Dept. of Internal Medicine, Vancouver (British Columbia), Canada

3 University of Calgary, Dept. of Mathematics and Statistics and Dept. of Critical Care, Calgary (Alberta), Canada

4 University of McGill, Dept. of Medicine, Division of Cardiology, Montreal (Quebec), Canada

## Introduction

Although electrocardiogram (ECG) interpretation is a core competency for all graduating medical students [1], literature from the past 3 decades has consistently shown that ECG interpretation skills are consistently below expectations for graduating medical students [2], [3], residents in training [4], [5], [6], [7], [8], [9], and physicians in practice [10], [11], [12]. ECG interpretation errors may expose patients to harm through delayed diagnosis, inappropriate investigations and treatment, and delays in appropriate treatment [13], [14]. There is an identified need for improvement to ECG learning in both undergraduate and residency training programs [15].

Unfortunately, variability and low performance of medical skills is not limited to ECG interpretation. High variability of procedural competence among residents, fellows, and attendings has been described for lumbar puncture [16], bariatric surgery [17], and insertion of intravascular catheters [18]. Such outcomes have generated calls for prompt changes to medical education [19].

Deliberate practice is widely cited as a key component of obtaining competence and mastery [20], [21]. Deliberate practice, a process of providing multiple iterations of structured practice and feedback until the trainee demonstrates the required competency [19], [22], [23], [24], has been described as superior to passive learning for skills acquisition [25], [26], [27]. Deliberate practice to obtain mastery has been demonstrated in multiple

domains including sports, gaming, the business world, and musical performance [28], [29]. Within medicine, studies have shown improved performance of specific skills via mastery learning approaches, including paracentesis, central line placement, and advanced cardiac life support skills [18], [30], [31].

The Clerkship Directors of Internal Medicine (CDIM) survey results in 2005 suggested that the majority of time spent on ECG teaching during clerkship was focused on didactic theory, with little formalized structured ECG practice [32]. Indeed, limited opportunities for practice and feedback have been identified as contributing to poor ECG interpretation skills [1].

The premise of a competency based learning approach is promotion based on performance that meets established standards. A population of students will demonstrate different learning rates for a given skill and will require different amounts of practice and feedback to obtain competency [32], [33]. Therefore, a flexible delivery of practice and feedback should help individualize training for each student's needs. Further, the optimal number of ECG cases that need to be practiced to achieve competence, and the time required to complete this practice and feedback would be helpful in planning resources for learning ECGs; this is currently unknown [34].

The first objective of this paper was to describe the amount of deliberate practice completed by a cohort of first year medical students who were learning ECG rhythm strip diagnoses. Second, we aimed to mathematically quantify the learning curve for rhythm strip diagnosis with respect to both time and number of cases practiced. The third objective was to describe student opinions regarding their experiences with deliberate practice.

## Methods

This was an observational associational cohort study that used a novel online platform to measure and describe practice behaviours and performance of medical students learning ECG rhythm strip diagnoses. An observational design was chosen because an experimental design was not possible for reasons of disparate treatment between intervention and control groups due to the absence of an appropriate pre-existing intervention with which to compare [35].

### Setting and participants

A convenience sample of first year medical students enrolled at 2 medical schools in Canada (McGill University and University of Calgary) in 2016 and 2017 were invited to participate in the study during their Cardiovascular courses. McGill offers 7 hours of lecture and 2 hours of workshop on ECG learning in a 6 week course; Calgary provides 7 hours of lecture and 0 hours of workshop in a 12 week course that is combined with the Respiratory curriculum. Both curricula include case based learning and some of these cases incorporate ECG's. Students

were invited to participate via e-mail sent by the undergraduate office and in-class announcements. The University of Calgary Conjoint Health Research Ethics Board approved the study. No funding was obtained for this study.

Students practiced rhythm strip cases through the freely accessible online modules on [<https://www.teachingmedicine.com/>] during independent study time. The 14 different ECG diagnoses chosen for learning were based on the Advanced Cardiac Life Support (ACLS) rhythms that must be mastered in order to manage a cardiac arrest (see table 1). The ECG's were presented as rhythm strips (as opposed to 12 lead ECGs). There were 3 discrete practice modules, each with one different example of the 14 diagnoses (including one normal rhythm). Thus, completion of one module guaranteed one exposure to each of the 14 diagnoses. Students were required to complete at least one practice module as part of their coursework. Students could practice each module as many times as they wanted. Performance during practice was quantified as the percentage of rhythm strips that were diagnosed correctly by each student, as compared to the correct answer that was unanimously agreed upon by 3 experts. Time to complete the practice modules was recorded by the online platform. The timer started when the module was entered and stopped when the module was exited. If there was no user activity for greater than 5 minutes, then 4 minutes was subtracted and the timer was stopped.

Each rhythm strip case required the student to answer 8 questions characterizing the ECG, followed by 2 questions about the diagnosis (see table 2). Except for the question on ventricular rate, all questions were multiple-choice with the diagnosis question providing 14 options. Motivation techniques, such as showing students their evolving performance, popup messages that rewarded and encouraged excellent performance, and providing comparison statistics between the user and the mean scores of their peers were built into the practice modules in an attempt to increase student engagement [36].

Multiple considerations informed the design of the feedback that was provided [37]. Four types of immediate feedback were available to each student. First, answers were identified as correct or incorrect. Second, if the submitted diagnosis was incorrect, a table displayed the correct diagnosis, the student's incorrect diagnosis, the diagnostic criteria of both diagnoses with highlighted differences between the two sets of criteria. Third, an explanatory discussion of the case was provided. The fourth form of feedback was the opportunity to ask questions of the course instructor via email, with an email response provided within 24 hours.

All student responses were recorded and made available for analysis. At the end of their Cardiovascular course, students completed a mandatory rhythm strip exam that counted toward 5% of their final course grade. Exam results from McGill were excluded from analysis because the exam questions were taken from the practice modules and thus did not represent a valid examination of previ-

**Table 1: Diagnoses Included in Practice Cases**

1. Normal sinus rhythm (NSR)	8. Second degree HB, type 1
2. Sinus bradycardia	9. Second degree HB, type 2
3. Sinus tachycardia	10. Third degree HB
4. Atrial fibrillation	11. Ventricular tachycardia
5. Atrial flutter	12. Ventricular fibrillation
6. Junctional Rhythm	13. Supraventricular tachycardia (SVT)
7. First degree heart block (HB)	14. Bundle branch block or conduction delay

**Table 2: Questions and Possible Answers Asked for Each Rhythm Strip.**

1. What is the ventricular rate? a. (text entry of a number)
2. Ventricular rhythm? a. Regular b. Regular with missing/extra beats c. Irregular with a pattern d. Irregular with no pattern or indeterminate
3. Are any P waves seen? a. Yes b. No
4. Ratio of P waves to QRS? a. Equal b. More P waves c. More QRS complexes d. No P Waves
5. Are P waves all same shape? a. Yes b. No
6. P waves conducted to ventricles? a. Yes b. No (P waves present) c. Sometimes d. No P waves
7. PR interval? a. Normal b. Long, constant c. Long, changing d. Short e. No P waves f. Not applicable (P waves present)
8. QRS width? a. Narrow b. Wide c. No QRS
9. Origin(s) of waves? (Multiple answers allowed) a. SA node b. Atria c. AV node d. Any supraventricular location e. Ventricle
10. Diagnosis: (see Table 1)

ously unseen cases. The University of Calgary used an offline paper exam which contained no rhythm strips from the practice modules. Each rhythm strip exam case was comprised of a single diagnosis that was considered by 2 experts to be similar in difficulty to the practice cases, and contained the same diagnoses as the rhythm strips in the practice modules. Performance on the exam was defined as the percentage of rhythm strips that were correctly diagnosed. Failure to complete the mandatory

practice module or the exam resulted in an “Incomplete” status in the course.

### Data analysis

Data was de-identified and exported to a local computer. Data was analyzed using R-3.5.1 [38], nlme-3.1-137 [39], Stata 10.0 (Statacorp LLP) and Excel software (Microsoft Excel for Mac, Version 15.28). Descriptive statistics, in-

cluding means (with standard deviations [SD]) and proportions, were used to summarize survey data.

## Practice data

This data is comprised of two independent populations, is non-linear and compares multiple paired samples per individual; the individuals do not all have the same number of paired samples. Two scatter plots were created to observe the relationships between diagnostic accuracy and time per module spent practicing vs. the number of modules completed. The Gompertz function was used to graphically represent the means of this data [40]. Differences between the 2 schools were assessed using ANCOVA. Differences between paired successive modules were tested for significance using paired t-tests with Bonferroni correction.

## Exam data

This data is comprised of one population, is non-linear, unpaired and it is assumed that all observations are independently measured. One scatter plot was created to observe the relationship between diagnostic accuracy and total time spent practicing vs. the number of modules completed. Based on visual inspection of this scatter plot, three mathematical functions: Gompertz function, Michaelis-Menten (MM) function, and quadratic function were chosen as possible candidates to represent these 2 relationships [40]. The coefficients associated with the models were assessed for statistical significance of their fit to the data. Alpha was set to 0.05 a priori. Akaike information criteria (AIC) and correlation between observed and predicted measurements are used for measuring the goodness fit of the mathematical models.

## Results

### Amount of practice

A total of 384 students were invited to participate and 314 (82%) consented. Among the 298 (95%) of consented participants who completed the pre-survey, the mean age was 24.9 (SD=4.2) years and 54% were female. 14 (4%) students indicated they had previously used online practice modules for rhythm strip learning. The mean number of times each of the 14 diagnoses were practiced per student was 4.1 (SD=2.7), representing 59 rhythm strips practiced per student (see figure 1). A total of 24 (8%) students practiced only the mandatory single module prior to the exam. Nine students did not complete the mandatory module prior to the exam and completed it after the exam. Forty-eight students completed 10 or more modules, which translated to  $\geq 140$  rhythm strips each. The maximum number of modules completed by a student was 20, representing 280 rhythm strips. The total number of rhythm strips practiced by all 314 students

was 18,466 and thus 18,466 instances of feedback were delivered.

## Practice performance

Figure 2, left and right shows the scatter plots relating the number of practice modules completed with diagnostic accuracy and per module practice time in two different schools during practice. There were no statistical differences in diagnostic accuracy during practice between the two schools. There were no statistical differences in per module practice time between the two schools except for one time point (at module 3). Differences in diagnostic accuracy between consecutive modules showed statistically significant increases between modules: 1 and 2; 2 and 3; not 3 and 4, but again 4 and 5, indicating that diagnostic accuracy was continuing to increase through modules 1-3 and possibly also continuing up to module 5 (full statistical values reported in online supplemental material Nr. 1 see attachment 1). Differences in per module practice time significantly decreased between consecutive modules: 1 and 2; through to modules 7 and 8 inclusive, indicating that speed was continuing to increase throughout all these modules.

## Exam performance

The mathematical function that best approximated the diagnostic accuracy learning curve was the Gompertz equation with the following coefficients:  $Y \sim 88 * \exp(0.51 * \exp(0.47 * M))$ . The function that best described the total practice time curve was the Michaelis-Menten function with the coefficients:  $Y \sim 671 * M / (12.1 + M)$ . M represents the number of modules completed. The AIC goodness of fit assessment for both of these mathematical functions produced p values  $< 0.001$  for all coefficients in the models. These curves are used to estimate the workload required by students to obtain a pre-defined level of performance on the exam. A two-stage model for finding the time spent practicing from the expected accuracy is illustrated in figure 3. The estimate Gompertz model is used to find the corresponding required number of modules, which is then used as an input for the estimated Michaelis-Menten function to predict the time needed for practice. Table 3 shows the total practice time and required number of modules practiced to achieve scores ranging from 70 to 85% on the exam.

In the pre-survey, students reported how much time they spent practicing rhythm strip interpretations prior to the research study; when students were stratified according to pre-study practice, there were no statistical differences in exam performance.

## Student satisfaction

Based on the survey completed at the end of the Cardiovascular courses, 174 (of 314 who consented) students indicated that the learning modules were effective (97%), efficient (97%) and enjoyable (92%) (online supplement

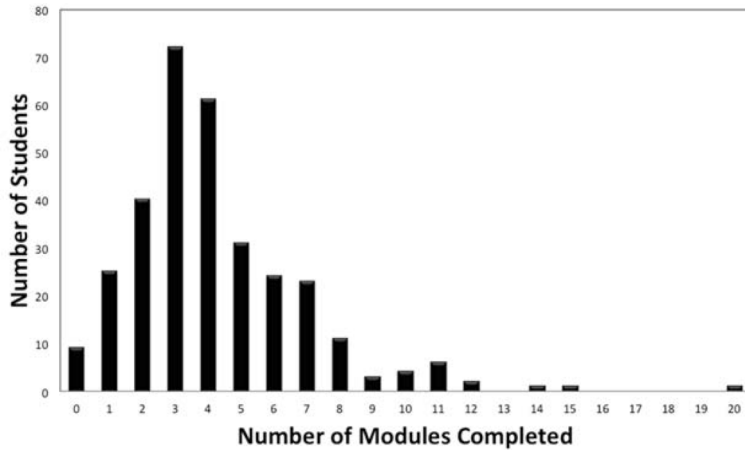


Figure 1: The number of modules completed by each student. One module contains 14 rhythm strip cases.

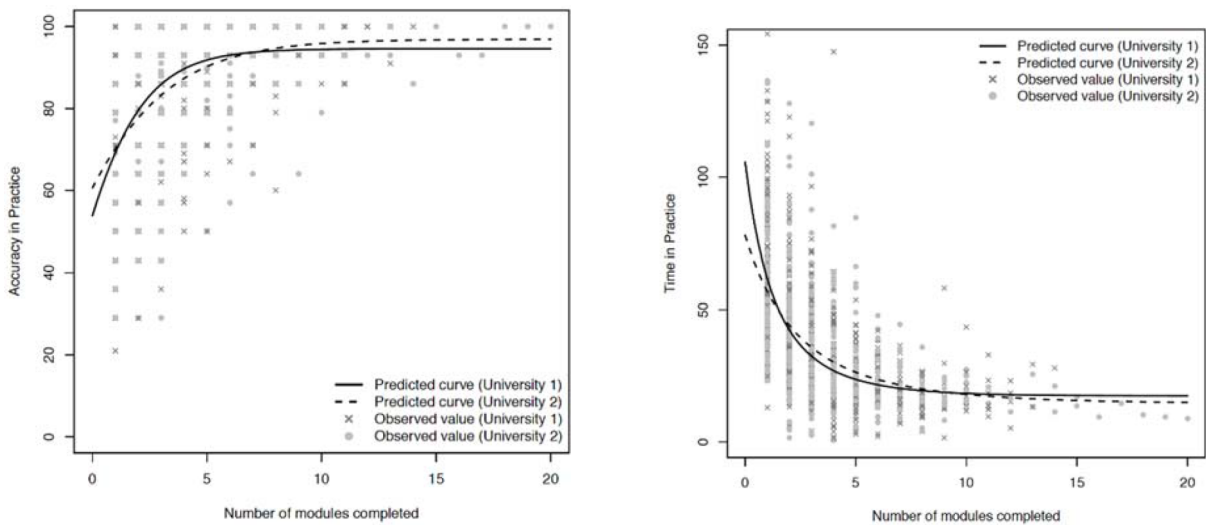


Figure 2: Left shows diagnostic accuracy during practice of two different medical schools during rhythm strip practice. Right shows per module practice time. There are no significant differences between the two schools except for one time difference at module #3, which is likely not “clinically” significant.

Table 3: Number of Modules Completed and Total Practice Time required to achieve pre-defined Target Diagnostic Accuracies.

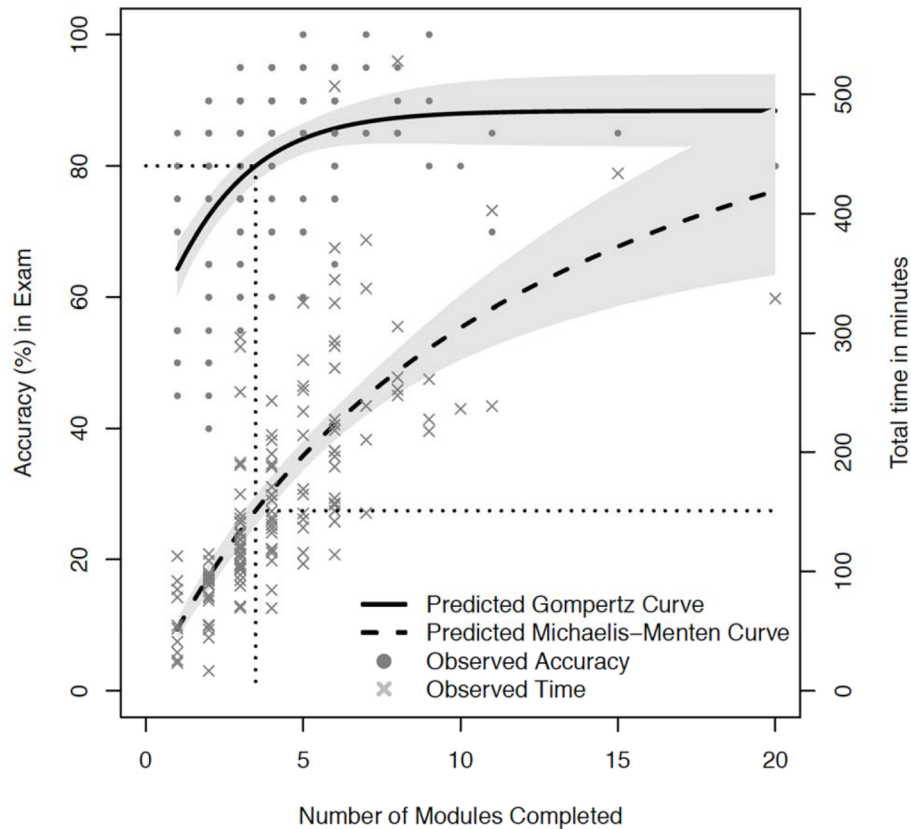
Target Diagnostic Accuracy	Number of Modules	Number of Cases*	Time (min)
70%	1.85	26	90
75%	2.42	34	111
80%	3.50	49	141
85%	5.2	73	202

\* There are 14 cases in one module, so the number of cases is equal to the number of modules x 14.

material Nr. 2 see attachment 2). Most students believed practice is required to learn ECG interpretation (99%), that immediate feedback was helpful (95%), and that they were interested in using the same method for learning other diagnostic skills, such as x-ray and ultrasound interpretation (99%).

### Instructor workload

In terms of instructor workload to respond to feedback emails from the students, a total of 14 email questions were submitted by students from McGill and 37 were submitted by Calgary students. Comparing emails to total cases practiced, 51 feedback emails were submitted for



**Figure 3:** Diagnostic accuracy and total practice time are plotted against the total number of modules practiced. The solid line curve is the Gompertz curve that estimates diagnostic accuracy. The dashed curve is the Michaelis-Menten curve that estimates total practice time. Grey shaded regions represent 95% CI. The horizontal and vertical dotted line shows an exemplar 80% diagnostic accuracy mapping to the estimated number of modules and total practice time required to obtain this competency level. See also tab. 3 for calculated values.

18,466 practice cases, which is approximately 1 email for every 360 cases practiced.

## Discussion

Our data shows that first year medical students practiced interpreting a mean of 59 rhythm strips prior to a rhythm strip exam and in total, over 18,000 instances of feedback were provided to 314 students at 2 different medical schools. This is important for several reasons. First, challenges have been reported on providing feedback for deliberate practice [37]. We have described the details of successfully providing feedback for deliberate practice to two large cohorts of medical students, thus addressing a need identified within medical education literature. Second, our previously unpublished local data demonstrated that when practice was not mandated and there was no rhythm strip exam, students completed a mean of only 6 practice rhythm strips despite strong promotion and encouragement to practice by instructors [41]. Comparing these findings to the findings of our current study, introducing a mandatory practice module and a dedicated rhythm strip summative exam resulted in a 9-fold increase in practice behaviours by the students. The students were willing, able and motivated to practice well beyond the mandated workload by the course instructors,

completing a mean of 59 practice rhythm strips when only 14 were required.

The dedicated rhythm strip summative exam was likely a strong motivator for student practice behaviour. Other studies have described the positive impact of summative assessments specifically on student performance on ECG interpretation [42], [43]. In residency training programs, periodic objective assessments of ECG interpretation skills have been recommended [34]. In addition to formative feedback, Raupach et al. have identified that summative feedback increased medium term retention of ECG interpretation skills regardless of teaching technique and thus, should be strongly considered as an important component for skill retention [44].

The learning curve for ECG rhythm strip interpretation in medical students has not been previously quantified. A learning curve is a graphic illustration relating a metric of time or effort with performance of a skill [22]. We demonstrated that the diagnostic accuracy and time spent practicing were very similar between students at two different medical schools. Students continued to demonstrate improvement both in diagnostic accuracy and speed of diagnosis while practicing up to 4 modules (56 cases). The value of 56 cases emphasizes the large number of practice cases that should be made available to students so that they have the opportunity to continue to practice while they are continuing to improve. Identify-

ing when the learning curve reaches its asymptote is important to indicate when learning probably stops.

Using the curves in figure 3, the number of ECG cases and the time required to obtain pre-determined levels of competency in first year medical students can be determined (see table 3). This information is valuable for students to help them budget their study time and set realistic goals of performance. The results of the learning curve analysis can also provide direction for curriculum development; a competency standard of diagnostic accuracy can first be chosen and the learning curves estimate how much deliberate practice is required for the students. For example, if the competency standard is set to 75% diagnostic accuracy, 34 practice cases and 111 minutes of practice will be required for the average medical student to achieve this level of performance. We feel strongly that the responsibility of providing the required practice and feedback to obtain medical skills belongs to the medical school and its faculty, in contrast to being imposed on the students.

Previous calls for changes to how ECG interpretation is taught suggests that more practice opportunities are required [2]. The 2013 CDIM survey of internal medicine clerkship programs reported on the number of 12 lead ECGs that students in third year clerkship rotations formally interpreted under supervision [1]. Students from only 37% of medical schools formally interpreted more than ten 12-lead ECGs during their internal medicine rotation [1]. All other respondents indicated that their students interpreted fewer ECGs, or did not respond to this question. Data for pre-clerkship ECG training, which is the population we studied, is sparse.

Our study investigated rhythm strip interpretation and not 12 lead ECG interpretation. However, 12 lead ECG interpretation is more complex than rhythm strips and thus, could be expected to require even more practice than rhythm strips to achieve competency. Our results, combined with the results of the CDIM survey, may suggest that the ECG practice needs of students are not being met at many medical schools. To further highlight the gap between what is provided to trainees and what is needed by trainees, the ACC/AHA guidelines for learning 12 lead ECGs recommend that initial learning should incorporate a minimum of 500 supervised interpretations [45], although the evidence for this recommendation is unclear.

One of the key components of skill development is feedback [46]. Formative feedback can help students self-monitor and determine if they have met the competency standards defined by their school [47], [48]. The quality and nature of feedback has a strong influence on motivation [49], and is suggested to be most useful when instructors assume an active role in the learning process [50]. An absence of feedback or lack of support can lead to low motivation and early termination of self-directed courses [49]. Therefore, a self-directed learning resource should incorporate direct involvement of instructors. Our learning tool provided a blended form of feedback, including 3 different components of automated feedback, and

an email function that enabled efficient involvement of the local instructor.

There are logistical challenges to providing individualized feedback to students when there are many students and few instructors. The first consideration is scalability and feasibility. For example, for a class of 100 students where each student completes 50 practice ECGs, feedback would be required 5,000 times. To provide deliberate practice to our cohort of 314 students, 18,466 instances of both practice and feedback were required. With computer algorithms providing automated feedback, the workload of providing additional email feedback was low for the instructors. The workload of additional feedback that was requested from students via email to their local instructors was on average, 25 emails per instructor and not deemed overwhelming. Viewed another way, there was one feedback email question for every 360 cases practiced.

Another advantage of automated feedback is consistency; all learners receive the same quality of feedback because the influence of assessor variability is removed from the process. Additionally, the quality of the feedback can be increased over time as performance data of students is collected and analyzed and common errors are identified. This information informs modifications to case discussions, so that common errors can be directly and preemptively addressed.

A positive emotional response to a learning environment facilitates student engagement [51], [52]. Our survey data confirmed that 92% of students described the deliberate practice learning process as “very fun” or “a little enjoyable”. Student experiences may also have been positively influenced by their perception that the learning resources were both effective and efficient. Additionally, individualized feedback likely also contributed to both student satisfaction and performance, given that students indicated that instant feedback was either “absolutely required” (95%) or “helpful” (4%).

Strengths of this study include unobtrusive collection of learning analytics during core curricular activities, thereby minimizing participant bias and maximizing data collection. Enrolling students from 2 medical schools increases the generalizability of our findings. The study was easy to implement and will be scalable for future study of other diagnostic skills.

There are many limitations to our research. A comparative experimental design is methodologically stronger, but the absence of a control group with whom we could justify equipoise was not possible. No previous method of providing deliberate practice existed at either medical school and we could not randomize students into a group that did not practice; therefore, our study was observational.

Our independent variable was quantified on the basis of module completion, and not individual case completion. If we had structured our data collection on individual cases completed instead of the modules completed, we would have obtained higher fidelity data. Realizing this limitation after data collection, we have modified the data

collection software to enable future projects to analyze case by case data.

Post analysis, we realize that our digital practice library is likely too small to meet the needs of the average student should we target a diagnostic accuracy of 80% or greater. Further, dividing the cases into 3 separate modules likely creates artificial and possibly meaningless stop points for the learner; it would probably be better to have all practice cases within one module, and have well in excess of 50 practice cases to help ensure there are enough cases for students at the slower end of the learning curve. As we have a total of 42 unique cases, we fall short of this goal and this is a limitation in our study because students who practiced more than 42 cases were repeating cases they had previously practiced. We measured short term retention of rhythm strip interpretation; the exact timing of when the students completed practice was not measured, but was contained within a 10 week learning block and it is probable that a lot of practicing occurred within a 2-3 week proximity of the exam. We cannot extrapolate our results to long term retention, but hope to be able to re-assess students in more senior years of training and repeat our analysis with long term (2 years) retention.

We studied performance in ACLS level rhythm strip ECG interpretation and these results cannot be extrapolated to full 12 lead ECG interpretation, which involves more analysis, and often multiple co-existing diagnoses. Importantly, the students were interpreting the ECG rhythms without any clinical context; diagnostic interpretation might change when patient information is provided [53], [54].

To our knowledge, our students used primarily one learning tool for practicing ECG's. Therefore, we cannot extrapolate our results to other learning tools; it would, however, be very interesting to compare learning curve slopes for different tools so that the tool that produces the fastest learning with least effort could be identified. Further, our assessment tool (the rhythm strip exam) has not yet been formally validated.

Another limitation in our study is the lack of analysis on each individual learner; we are reporting means of performance across many students. Not all learners follow the same learning curve; in fact, the mean of student performance rarely describes the performance of an individual student [55].

In conclusion, we successfully provided deliberate practice to a large cohort of first year medical students and our data quantifies a learning curve for ACLS level rhythm strip interpretation using a specific online learning module. These results may assist in curricular design for ECG rhythm strip interpretation, a required skill for managing cardiac arrest.

## Notes

Jason Waechter is the founder of teachingmedicine.com. The modules used for this project are currently open access and freely accessible.

## Ethical approval

The University of Calgary Conjoint Health Research Ethics Board has approved this research study (REB14-0654\_MOD2). The University of McGill has approved this research study (IRB study number A07-E50-15B).

## Previous presentations

Poster presentation titled "Learning Curves for ECG Interpretation: Correlating Deliberate Practice with Performance." Presented at the 2017 Canadian Conference for Medical Education (CCME)

## Acknowledgement

We would like to thank Dr. Rachel Ellaway and Dr. Martin Pusic both for editing the manuscript and providing support for the project.

## Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

## Attachments

Available from

<https://www.egms.de/en/journals/zma/2019-36/zma001248.shtml>

1. Attachment\_1.pdf (63 KB)  
Statistical analysis of practice data
2. Attachment\_2.pdf (68 KB)  
Pre-survey completed by 298 students

## References

1. Jablonover RS, Stagnaro-Green A. ECG as an Entrustable Professional Activity: CDIM Survey Results, ECG Teaching and Assessment in the Third Year. *Am J Med.* 2016;129(2):226-230. DOI: 10.1016/j.amjmed.2015.10.034
2. Jablonover RS, Lundberg E, Zhang Y, Stagnaro-Green A. Competency in Electrocardiogram Interpretation Among Graduating Medical Students. *Teach Learn Med.* 2014;26(3):279-284. DOI: 10.1080/10401334.2014.918882
3. Kopec G, Magon W, Holda M, Podolec P. Competency in ECG Interpretation Among Medical Students. *Med Sci Monit* 2015;21:3386-3394. DOI: 10.12659/MSM.895129



4. Pinkerton RE, Francis CK, Ljungquist KA, Howe GW. Electrocardiographic training in primary care residency programs. *JAMA*. 1981;246(2):148-150. DOI: 10.1001/jama.1981.03320020040021
5. Sur DK, Kaye L, Mikus M, Goad J, Morena A. Accuracy of electrocardiogram reading by family practice residents. *Fam Med*. 2000;32(5):315-319.
6. Goodacre S, Webster A, Morris F. Do computer generated ECG reports improve interpretation by accident and emergency senior house officers? *Postgrad Med J*. 2001;77(909):455-457. DOI: 10.1136/pmj.77.909.455
7. Higuera J, Gómez-Talkavera S, Ganadas V, Bover R, Losas M, Gómez-Polo JC, Olmos C, Fernandez C, Villacastin J, Macaya C. Expertise in Interpretation of 12-Lead Electrocardiograms of Staff and Residents Physician: Current Knowledge and Comparison between Two Different Teaching Methods. *J Caridol Curr Res*. 2016;5(3):00160. DOI: 10.1546/jccr.2016.05.00160
8. Hartman ND, Wheaton NB, Williamson K, Quattromani EN, Branzetti JB, Aldeen AZ. A Novel Tool for Assessment of Emergency Medicine Resident Skill in Determining Diagnosis and Management for Emergent Electrocardiograms: A Multicenter Study. *J Emerg Med*. 2016;51(6):697-704. DOI: 10.1016/j.jemermed.2016.06.054
9. Eslava D, Dhillon S, Berger J, Homel P, Bergmann S. Interpretation of electrocardiograms by first-year residents: the need for change. *J Electrocardiol*. 2009;42(6):693-697. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2009.07.020
10. Morrison WG, Swann IJ. Electrocardiograph interpretation by junior doctors. *Arch Emerg Med*. 1990;7(2):108-110. DOI: 10.1136/emj.7.2.108
11. Jayes RL Jr, Larsen GC, Beshansky JR, D'Agostino RB, Selker HP. Physician electrocardiogram reading in the emergency department – accuracy and effect on triage decisions: findings from a multicenter study. *J Gen Intern Med*. 1992 Jul-Aug;7(4):387-92. DOI: 10.1007/bf02599153
12. Kuhn M, Morgan MT, Hoffman JR. Quality assurance in the emergency department: evaluation of the ECG review process. *Ann Emerg Med*. 1992;21(1):10-15. DOI: 10.1016/S0196-0644(05)82229-2
13. Kohn LT, Corrigan JM, Donaldson MS. *To Err is Human: Building a Safer Health System*. Washington (DC): National Academies Press (US); 2000.
14. Snoey ER, Housset B, Guyon P, ElHaddad S, Valty J, Hericord P. Analysis of emergency department interpretation of electrocardiograms. *J Acc Emerg Med*. 1994;11(3):149-153. DOI: 10.1136/emj.11.3.149
15. Eslava D, Dhillon S, Berger J, Homel P, Bergmann S. Interpretation of electrocardiograms by first-year residents: the need for change. *J Electrocardiol*. 2009;42(6):693-697. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2009.07.020
16. Barsuk JH, Cohen ER, Caprio T, Mcgaghie WC, Simuni T, Wayne DB. Simulation-based education with mastery learning improves residents' lumbar puncture skills. *Neurol*. 2012;79(2):132-137. DOI: 10.1212/WNL.0b013e31825dd39d
17. Dlouhy BJ, Rao RC. Surgical skill and complication rates after bariatric surgery. *New Engl J Med*. 2014;370(3):285-. DOI: 10.1056/NEJMc1313890
18. Barsuk JH, Ahyia SN, Cohen ER, Mcgaghie WC, Wayne DB. Mastery learning of temporary hemodialysis catheter insertion by nephrology fellows using simulation technology and deliberate practice. *Am J Kidney Dis*. 2009;54(1):70-76. DOI: 10.1053/j.ajkd.2008.12.041
19. Cohen ER, Mcgaghie WC, Wayne DB, Lineberry M, Yudkowsky R, Barsuk JH. Recommendations for Reporting Mastery Education Research in Medicine (ReMERM). *Acad Med*. 2015;90(11):1509-1514. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000933
20. Mcgaghie WC, Barsuk JH, Wayne DB. Mastery Learning With Deliberate Practice in Medical Education. *Acad Med*. 2015;90(11):1575. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000876
21. Ericsson KA. Acquisition and maintenance of medical expertise: a perspective from the expert-performance approach with deliberate practice. *Acad Med*. 2015;90(11):1471-1486. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000939
22. Pusic M, Pecaric M, Boutis K. How Much Practice Is Enough? Using Learning Curves to Assess the Deliberate Practice of Radiograph Interpretation. *Acad Med*. 2011;86(6):731-736. DOI: 10.1097/ACM.0b013e3182178c3c
23. Ericsson KA. Deliberate practice and the Acquisition and Maintenance of Expert Performance in Medicine and Related Domains. *Acad Med*. 2004;79(10 Suppl):S70-S1. DOI: 10.1097/00001888-200410001-00022
24. Kirkman MA. Deliberate practice, domain-specific expertise, and implications for surgical education in current climates. *J Surg Educ*. 2013;70(3):309-317. DOI: 10.1016/j.jsurg.2012.11.011
25. Mcgaghie WC, Issenberg SB, Cohen ER, Barsuk JH, Wayne DB. Does Simulation-Based Medical Education With Deliberate Practice Yield Better Results Than Traditional Clinical Education? A Meta-Analytic Comparative Review of the Evidence. *Acad Med*. 2011;86(6):706-711. DOI: 10.1097/ACM.0b013e318217e119
26. Duckworth AL, Kirby TA, Tsukayama E, Berstein H, Ericsson KA. Deliberate Practice Spells Success: Why Grittier Competitors Triumph at the National Spelling Bee. *Soc Psychol Person Sci*. 2011;2(2):174-181. DOI: 10.1177/1948550610385872
27. Mcgaghie WC, Issenberg SB, Cohen ER, Barsuk JH, Wayne DB. Medical Education Featuring Mastery Learning With Deliberate Practice Can Lead to Better Health for Individuals and Populations. *Acad Med*. 2011;86(11):e8-e9. DOI: 10.1097/ACM.0b013e3182308d37
28. Macnamara BN, Moreau D, Hambrick DZ. The Relationship Between Deliberate Practice and Performance in Sports. *Perspect Psychol Sci*. 2016;11(3):333-350. DOI: 10.1177/1745691616635591
29. Macnamara BN, Hambrick DZ, Oswald FL. Deliberate Practice and Performance in Music, Games, Sports, Education, and Professions: A Meta-Analysis. *Psychol Sci*. 2014;25(8):1608-1618. DOI: 10.1177/0956797614535810
30. Wayne DB, Butter J, Siddall VJ, Fudala MJ, Wade LD, Feinglass J, McGaghie WC. Mastery learning of advanced cardiac life support skills by internal medicine residents using simulation technology and deliberate practice. *J Gen Intern Med*. 2006;21(3):251-256. DOI: 10.1111/j.1525-1497.2006.00341.x
31. Barsuk JH, Cohen ER, Vozenilek JA, O'Connor LM, Mcgaghie WC, Wayne DB. Simulation-based education with mastery learning improves paracentesis skills. *J Grad Med Educ*. 2012;4(1):23-27. DOI: 10.4300/JGME-D-11-00161.1
32. O'Brien KE, Cannarozzi ML, Torre DM, Mechaber AJ, Durning SJ. Training and Assessment of ECG Interpretation Skills: Results From the 2005 CDIM Survey. *Teach Learn Med*. 2009;21(2):111-115. DOI: 10.1080/10401330902791255
33. Englander R, Flynn T, Call S, Carraccio C, Cleary L, Fulton TB, et al. Toward Defining the Foundation of the MD Degree: Core Entrustable Professional Activities for Entering Residency. *Acad Med*. 2016;91(10):1352-1358. DOI: 10.1097/ACM.0000000000001204

34. Salerno SM, Alguire PC, Waxman HS. Competency in Interpretation of 12-Lead Electrocardiograms: A Summary and Appraisal of Published Evidence. *Ann Intern Med.* 2003;138(9):751-760. DOI: 10.7326/0003-4819-138-9-200305060-00013
35. Ringsted C, Hodges B, Scherpbier A. 'The research compass': An introduction to research in medical education: AMEE Guide No. 56. *Med Teach.* 2011;33(9):695-709. DOI: 10.3109/0142159X.2011.595436
36. Fleishman EA. On the relation between abilities, learning, and human performance. *Am Psychol.* 1972;1017-1032. DOI: 10.1037/h0033881
37. Eppich WJ, Hunt EA, Duval-Arnould JM, Siddall VJ, Cheng A. Structuring Feedback and Debriefing to Achieve Mastery Learning Goals. *Acad Med.* 2015;90(11):1501-1508. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000934
38. Team RC. R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2014.
39. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D. *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models.* 2018.
40. Paine CET, Marthews TR, Vogt DR, Purves D, Rees M, Hector A, Turnbull LA. How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. *Method Ecol Evol.* 2011;3(2):245-256. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2011.00155.x
41. Waechter J. Unpublished data from University of Calgary, Undergraduate Medical School, years 2014-2017. Calgary: University of Calgary; 2017.
42. Raupach T, Brown J, Anders S, Hasenfuss G, Harendza S. Summative assessments are more powerful drivers of student learning than resource intensive teaching formats. *BMC Med.* 2013;11(1):61. DOI: 10.1186/1741-7015-11-61
43. Raupach T, Hanneforth N, Anders S, Pukrop T, Th J ten Cate O, Harendza S. Impact of teaching and assessment format on electrocardiogram interpretation skills. *Med Educ.* 2010;44(7):731-740. DOI: /10.1111/j.1365-2923.2010.03687.x
44. Raupach T, Andresen JC, Meyer K, Strobel L, Koziolok M, Jung W, Brown J, Anders S. Test-enhanced learning of clinical reasoning: a crossover randomised trial. *Med Educ.* 2016;50(7):711-720. DOI: 10.1111/medu.13069
45. Kadish AH, Buxton AE, Kennedy HL, Knight BP, Mason JW, Schuger CD, Tracy CM, Winters WL Jr, Boone AW, Elnicki M, Hirshfeld JW Jr, Lorell BH, Rodgers GP, Tracy CM, Weltz HH; American College of Cardiology/American Heart Association/American College of Physicians-American Society of Internal Medicine Task Force; International Society for Holter and Noninvasive Electrocardiology. ACC/AHA clinical competence statement on electrocardiography and ambulatory electrocardiography: A report of the ACC/AHA/ACP-ASIM task force on clinical competence (ACC/AHA Committee to develop a clinical competence statement on electrocardiography and ambulatory electrocardiography). *Circulation.* 2001;104(25):3169-3178. DOI: 10.1161/circ.104.25.3169
46. Mitchell T, Chen SY, Macredie RD. The relationship between web enjoyment and student perceptions and learning using a web-based tutorial. *Learn Media Technol.* 2005;30(1):27-40. DOI: 10.1080/13581650500075546
47. Harlen W, Crick RD. A systematic review of the impact of Summative assessment and tests on students' motivation for Learning (EPPI-Centre Review, version 1.1\*). *Research Evidence in Education Library.: EPPI Center;* 2002.
48. Pusic MV, Chiamonte R, Gladding S, Andrews JS, Pecaric MR, Boutis K. Accuracy of self-monitoring during learning of radiograph interpretation. *Med Educ.* 2015;49(8):838-846. DOI: 10.1111/medu.12774
49. Orrell J. Feedback on learning achievement: rhetoric and reality. *Teach High Educ.* 2006;11(4):441-456. DOI: 10.1080/13562510600874235
50. Ericsson KA, Krampe RT, Tesch-Römer C. The role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance. *Psychol Rev.* 1993;100(3):363-406. DOI: 10.1037/0033-295X.100.3.363
51. Malone TW. Toward a theory of intrinsically motivating instruction. *Cogn Sci.* 1981;5(4):333-369. DOI: 10.1207/s15516709cog0504\_2
52. Huang WH, Soman D. *A Practitioner's Guide to Gamification of Education. Research Report Series Behavioural Economics in Action.* Toronto: University of Toronto, Rotman School of Management; 2013.
53. Grum CM, Gruppen LD, Woolliscroft JO. The influence of Vignettes on EKG Interpretation by Third-year Students. *Acad Med.* 1993;68(10 Suppl):S61-63. DOI: 10.1097/00001888-199310000-00047
54. Hatala R, Norman GR, Brooks LR. Impact of a clinical scenario on accuracy of electrocardiogram interpretation. *J Gen Intern Med.* 1999;14(2):126-129. DOI: 10.1046/j.1525-1497.1999.00298.x
55. Pusic MV, Boutis K, Hatala R, Cook DA. Learning Curves in Health Professions Education. *Acad Med.* 2015;90(8):1034-1042. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000681

**Corresponding author:**

Clin. Associate Prof. Jason Waechter, MD  
University of Calgary, Depts. of Critical Care and  
Anesthesiology, 1403 29 St NW, Calgary (Alberta), Canada  
jason.waechter@ahs.ca

**Please cite as**

Waechter J, Reading D, Lee CH, Walker M. Quantifying the medical student learning curve for ECG rhythm strip interpretation using deliberate practice. *GMS J Med Educ.* 2019;36(4):Doc40. DOI: 10.3205/zma001248, URN: urn:nbn:de:0183-zma0012482

**This article is freely available from**

<https://www.egms.de/en/journals/zma/2019-36/zma001248.shtml>

**Received:** 2018-10-29

**Revised:** 2019-04-07

**Accepted:** 2019-05-28

**Published:** 2019-08-15

**Copyright**

©2019 Waechter et al. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License. See license information at <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

# Quantifizierung der Lernkurve von Medizinstudierenden für die EKG-Rhythmusstreifeninterpretation im Rahmen einer bewussten Praxis (Deliberate Practice)

## Zusammenfassung

**Ziele:** Der Kompetenzerwerb von medizinischen Fähigkeiten wie der Interpretation von Elektrokardiogrammen (EKGs) erfordert wiederholtes Üben und Feedback. Strukturierte wiederholte Übungen und Feedback für die Durchführung von EKGs stehen den meisten Medizinstudierenden in der Regel nicht zur Verfügung, sodass der Kompetenzerwerb von einer opportunistischen Ausbildung im Rahmen klinischer Praktika abhängt. Unser Ziel war die Untersuchung folgender Aspekte:

1. die Anzahl der bewussten Übungen zum Erlernen der EKG-Rhythmusstreifendiagnose bei Medizinstudierenden im ersten Jahr,
2. die Lernkurve für eine Rhythmusstreifendiagnose und
3. die Erfahrungen der Studierenden mit bewusstem Üben.

**Methodik:** Medizinstudierenden des ersten Jahrgangs zweier medizinischer Fakultäten wurden online Übungsfälle zum Thema Rhythmusstreifen bereitgestellt. Die diagnostische Genauigkeit wurde während der gesamten Übungen gemessen und die Studierenden erhielten für jeden abgeschlossenen Fall ein Feedback. Die Gesamtzahl der geübten Fälle und die Zeit, die mit dem Üben verbracht wurde, wurden mit ihrer Leistung während der Übungen und bei einer Prüfung korreliert.

**Resultate:** 314 von 384 (82%) Studierende willigten ein. Die durchschnittliche Anzahl der EKGs, mit denen jeder Studierende übte, betrug 59 (Gesamtanzahl 0-280), was einer Gesamtzahl von 18.466 Fällen bewusster Praxis entspricht. Wir generierten mathematische Modelle, die sowohl die Anzahl der geübten Fälle als auch die Zeit, die mit der Übung verbracht wurde, genau mit der diagnostischen Korrektheit bei einer Prüfung korrelierten ( $p < 0.001$ ). Beispielsweise mussten die Studierenden durchschnittlich 112 Minuten und 34 Übungsfälle absolvieren, um 75% für eine EKG-Rhythmusstreifenprüfung zu erhalten. Die Zufriedenheit der Studierenden war bei den Online-Fällen hoch.

**Schlussfolgerungen:** Es ist uns gelungen, einer großen Gruppe von Studierenden an zwei medizinischen Fakultäten eine gezielte Übung zur Interpretation von EKG-Rhythmusstreifen bereitzustellen. Wir quantifizierten eine Lernkurve, welche eine Schätzung der Anzahl der Fälle und die Übungszeit darstellt, die benötigt werden, um ein vorgegebenes, diagnostisches Genauigkeitsniveau zu erreichen. Diese Daten können zur Entwicklung eines kompetenzbasierten Curriculum-Ansatzes beitragen.

**Schlüsselwörter:** Lernkurve, Elektrokardiographie, Kompetenzbasierte Ausbildung, bewusste Praxis, Deliberate Practice

## Einleitung

Obgleich die Interpretation des Elektrokardiogramms (EKG) eine Kernkompetenz für sämtliche graduierten Medizinstudenten darstellt [1], zeigen Studien der letzten

3 Jahrzehnte immer wieder, dass die Fähigkeit der zur EKG-Interpretation stets unterhalb den Erwartungen für Medizinabsolventen [2], [3], in der Schulung befindliche Ärzte (Vorklinik) sowie [4], [5], [6], [7], [8], [9] für Ärzte innerhalb der Klinik liegt [10], [11], [12]. EKG-Interpretationsfehler können Patienten durch verspätete Diagnosen, unangemessene Untersuchungen und Behandlungen

Jason Waechter<sup>1</sup>  
David Reading<sup>2</sup>  
Chel Hee Lee<sup>3</sup>  
Mathieu Walker<sup>4</sup>

1 University of Calgary, Depts. of Critical Care and Anesthesiology, Calgary (Alberta), Kanada

2 University of British Columbia, Dept. of Internal Medicine, Vancouver (British Columbia), Kanada

3 University of Calgary, Dept. of Mathematics and Statistics and Dept. of Critical Care, Calgary (Alberta), Kanada

4 University of McGill, Dept. of Medicine, Division of Cardiology, Montreal (Quebec), Kanada

sowie Verzögerungen bei der angemessenen Behandlung schädigen [13], [14]. Es besteht ein Verbesserungsbedarf hinsichtlich der EKG-Lernerfahrung in den Ausbildungsprogrammen für Studierenden als auch in der Vorklinik [15].

Leider ist die Variabilität und geringe medizinische Leistungsfähigkeit Fähigkeiten nicht nur auf die EKG-Interpretation beschränkt. Es wurde eine hohe Variabilität der Verfahrenskompetenz zwischen Vorklinik-Ärzten, Klinik- und Fachärzten für die Bereiche Lumbalpunktion, [16] Adipositas-Chirurgie, bariatrische Chirurgie [17] und das Einführen von intravaskulären Kathetern beschrieben [18]. Solche Ergebnisse haben zu Forderungen nach einer raschen Änderung der medizinischen Ausbildung geführt [19].

Eine bewusste Praxis (Deliberate Practice) wird weithin als Schlüsselkomponente für den Erwerb von Kompetenz und Meisterschaft erwähnt [20], [21]. Bewusste Praxis, ein Prozess, bei dem mehrere Iterationen strukturierter Praxis und Feedback bereitgestellt werden, bis der Trainee die erforderliche Kompetenz nachweist [19], [22], [23], [24] wird, im Vergleich zum passiven Lernen, für den Erwerb von Fähigkeiten als überlegene Strategie beschrieben [25], [26], [27]. Bewusste Praxis zur Erlangung der Meisterschaft ist in mehreren Bereichen demonstriert worden, darunter Sport, Gaming, der Geschäftswelt und bei musikalischen Leistungen [28], [29]. Medizinische Studienergebnisse haben verbesserte Ergebnisse in Fällen gezeigt, in denen die Leistung spezifischer Fähigkeiten durch Meister-Lernansätze, einschließlich Parazentese, Zentrallinienplatzierung und fortgeschrittene Fähigkeiten zur Unterstützung des kardialen Lebens, verbessert werden konnte [18], [30], [31].

Die Ergebnisse einer Umfrage der Clerkship Directors of Internal Medicine (CDIM) im Jahr 2005 deuten darauf hin, dass sich der Großteil der Zeit, der auf den EKG-Unterricht aufgewendet wurde, auf den Bereich didaktische Theorie konzentrierte, mit einem geringen Anteil an formalisierter strukturierter EKG-Praxis [32]. Tatsächlich wurden begrenzte Möglichkeiten für Praxis und Feedback als Beitrag zu schlechten EKG-Interpretationsfähigkeiten identifiziert [1].

Die Prämisse eines kompetenzbasierten Lernansatzes basiert auf einem leistungsorientierten Ansatz, der etablierten Standards entspricht. Eine Gruppe von Schülern zeigt unterschiedliche Lernraten für eine bestimmte Fähigkeit und benötigt unterschiedliche Mengen an Übung und Feedback, um Kompetenz zu erlangen [32], [33]. Daher sollte eine flexible Bereitstellung von Praxis und Feedback dazu beitragen, die Schulung eines jeden individuellen Studierenden an seine Bedürfnisse auszurichten. Darüber hinaus wäre die Kenntnis der optimalen Anzahl von EKG-Fällen, die zum Kompetenzgewinn geübt werden müssen, sowie die Zeit, die benötigt wird, um diese Praxis und das Feedback zu vervollständigen, hilfreich bei der Planung von Ressourcen für Lern-EKGs; diese Zahl ist derzeit nicht bekannt [34].

Das erste Ziel dieses Aufsatzes bestand darin, die Menge der bewussten Praxis zu beschreiben, die eine Gruppe

von Medizinstudenten im ersten Jahr ausgesetzt ist, welche die EKG-Rhythmusstreifendiagnose erlernen. Zweitens wollten wir mathematisch die Lernkurve für die Rhythmusstreifendiagnose in Bezug auf Zeit und Anzahl der geübten Fälle quantifizieren. Das dritte Ziel bestand darin, die Meinungen der Studierenden zu ihren Erfahrungen mit der bewussten Praxis (Deliberate Practice) zu beschreiben.

## Methoden

Dies stellte eine beobachtende assoziative Kohortenstudie dar, die eine neuartige Online-Plattform zur Messung und Beschreibung des Praxisverhaltens und der Leistung von Medizinstudenten, die lernen, eine EKG-Rhythmusstreifendiagnose durchzuführen, nutzte. Es wurde ein Beobachtungsansatz gewählt, da ein Ansatz auf Basis von Experimenten aus Gründen der Ungleichbehandlung von Interventions- und Kontrollgruppen nicht möglich wäre, da es keine geeignete vorherige Intervention zum Vergleich gibt [35].

## Studie und Teilnehmer

Eine Stichprobe unter Medizinstudenten des ersten Jahres, die 2016 und 2017 an zwei medizinischen Fakultäten in Kanada (McGill University und University of Calgary) eingeschrieben waren, wurde dazu eingeladen, an der Studie teilzunehmen, während diese ihre kardiovaskulären Kurse belegten. McGill bietet 7 Stunden Vorlesung und 2 Stunden Seminar zum Thema EKG-Lernen innerhalb eines 6-wöchigen Kurses an; Calgary bietet 7 Stunden Vorlesung und 0 Stunden Seminar innerhalb eines 12-wöchigen Kurses, der mit Curriculum, das die Atemwege betrifft, kombiniert wird. Beide Curricula beinhalten fallbezogenes Lernen und einige dieser Fälle beinhalten EKGs. Die Studierenden wurden zur Teilnahme per E-Mail eingeladen, die vom Studiensekretariat verschickt wurde, sowie durch Ankündigungen im Unterricht. Das University of Calgary Conjoint Health Research Ethics Board genehmigte die Studie. Für diese Studie wurden keine Mittel eingeworben.

Während des Selbststudiums übten die Studierenden Rhythmusstreifen-Fälle über die frei zugänglichen Online-Module auf [teachingmedicine.com](http://teachingmedicine.com). Die 14 verschiedenen EKG-Diagnosen, die für das Lernen ausgewählt wurden, basierten auf den Advanced Cardiac Life Support (ACLS) Rhythmen, die für die Behandlung eines Herzstillstands beherrscht werden müssen (siehe Tabelle 1). Die EKGs wurden als Rhythmusstreifen dargestellt (im Gegensatz zu 12-Kanal-EKGs). Es gab 3 diskrete Übungsmodule, von denen jedes ein anderes Beispiel der 14 Diagnosen (einschließlich Normalrhythmus) enthielt. Dieser Ansatz garantierte, dass in diesem Modul jede der 14 Diagnosen zum Tragen kam. Die Studierenden waren verpflichtet, im Rahmen ihrer Studienarbeit mindestens ein Praxismodul zu absolvieren. Die Studierenden konnten jedes Modul so oft üben, wie sie wollten. Die Leistung während der

**Tabelle 1: In den Praxisfällen enthaltene Diagnosen**

1. Normaler Sinusrhythmus (NSR)	8. Zweiter Grad HB, Typ 1
2. Sinusbradykardie	9. Zweiter Grad HB, Typ 2
3. Sinustachykardie	10. Dritter Grad HB
4. Vorhofflimmern	11. Ventrikuläre Tachykardie
5. Vorhofflattern	12. Herzkammerflimmern
6. Junktionaler Rhythmus	13. Supraventrikuläre Tachykardie (SVT)
7. Herzblock ersten Grades (HB)	14. Bündelverzweigung oder Leitungsverzögerung

Schulung wurde als Prozentsatz der Rhythmusstreifen quantifiziert, die von jedem Studierenden richtig diagnostiziert wurden, verglichen mit der richtigen Antwort, die von 3 Experten einstimmig angenommen wurde. Die Zeit für den Abschluss der Übungsmodule wurde von der Online-Plattform erfasst. Der Timer startete beim Eintritt in das Modul und stoppte beim Verlassen des Moduls. Kam es für einen Zeitraum länger als 5 Minuten zu keiner Benutzeraktivität, wurden 4 Minuten abgezogen und der Timer gestoppt.

Jeder Rhythmusstreifen-Fall erforderte, dass der Studierende 8 Fragen zur Charakterisierung des EKG beantwortete, gefolgt von 2 Fragen zur Diagnose (siehe Tabelle 2). Bis auf die Frage nach der ventrikulären Rate waren alle Fragen Multiple-Choice-Fragen, wobei die Diagnosefrage 14 Optionen bot. Motivationstechniken, wie z. B. die Offenlegung der sich entwickelnden Leistung der Schüler, Popup-Meldungen, die exzellente Leistung belohnten und förderten, und das Bereitstellen von Vergleichsstatistiken zwischen dem Benutzer und den Durchschnittswerten ihrer Kollegen wurden in die Übungsmodule integriert, um das Engagement der Studierende zu erhöhen [36].

Mehrere Überlegungen beeinflussten die Gestaltung des bereitgestellten Feedbacks [37]. Vier Arten von direktem Feedback standen jedem Studierenden zur Verfügung. Zunächst wurden die Antworten als korrekt oder falsch identifiziert. In einem zweiten Schritt wurden bei falsch eingereichten Diagnosen eine Tabelle mit der richtigen Diagnose, der falschen Diagnose des Studierenden sowie die diagnostischen Kriterien beider Diagnosen mit hervorgehobenen Unterschieden zwischen den beiden Kriterienansätzen angezeigt. Drittens wurde eine erklärende Diskussion zum Fall geführt. Die vierte Form des Feedbacks stellte die Möglichkeit dar, Fragen an den Kursleiter per E-Mail zu stellen, wobei die Antwort per E-Mail innerhalb von 24 Stunden erfolgte.

Alle Antworten der Studierenden wurden dokumentiert und zur Analyse zur Verfügung gestellt. Am Ende ihres kardiovaskulären Kurses absolvierten die Studierenden eine obligatorische Rhythmusstreifen-Prüfung, die bis zu 5% zu ihrer Abschluss-Kursnote beitrug. Prüfungsergebnisse von McGill wurden von der Analyse ausgeschlossen, da die Prüfungsfragen aus den Praxismodulen entnommen wurden und somit keine valide Prüfung von bisher unsichtbaren Fällen darstellten. Die University of Calgary führt eine klassische Papierprüfung durch, welche keine

Rhythmusstreifen aus den Übungsmodulen enthielt. Jeder Rhythmusstreifenuntersuchungsfall bestand aus einer einzigen Diagnose, die von 2 Experten als ähnlich schwierig eingestuft worden war wie die Praxisfälle und die gleichen Diagnosen wie die Rhythmusstreifen in den Übungsmodulen enthielt. Die Leistung bei der Untersuchung wurde definiert als der Prozentsatz der Rhythmusstreifen, die zu einer korrekten Diagnose führte. Das Nichtbestehen des obligatorischen Übungsmoduls oder der Prüfung führte zum Kursstatus „unvollständig“.

## Datenanalyse

Die Daten wurden de-identifiziert und auf einen lokalen Computer exportiert. Die Daten wurden mit R-3.5.1 [38], nlme-3.1-137 [39], Stata 10.0 (Statacorp LLP) und Excel (Microsoft Excel für Mac, Version 15.28) analysiert. Zur Zusammenfassung der Umfragedaten wurden deskriptive Statistiken einschließlich Mittelberechnungen (mit Standardabweichungen [SD]) und Größen verwendet.

## Praxisdaten

Diese Daten bestehen aus zwei unabhängigen Populationen, sind nichtlinear und vergleichen mehrere gepaarte Stichproben pro Person; die Individuen verfügen alle nicht über die gleiche Anzahl gepaarter Stichproben. Zwei Streudiagramme wurden erstellt, um die Zusammenhänge zwischen diagnostischer Genauigkeit und Zeit pro Modul beim Üben im Vergleich zur Anzahl der abgeschlossenen Module zu beobachten. Die Gompertz-Funktion wurde verwendet, um die Mittel dieser Daten grafisch darzustellen [40]. Die Unterschiede zwischen den beiden Schulen wurden mit ANCOVA bewertet. Unterschiede zwischen gepaarten aufeinanderfolgenden Modulen wurden mit gepaarten t-Tests mit Bonferoni-Korrektur auf ihre Bedeutung getestet.

## Untersuchungsdaten

Diese Daten bestehen aus einer Population, sind nichtlinear, ungepaart; sie stehen unter der Annahme, dass sämtliche Beobachtungen unabhängig voneinander gemessen werden. Ein Streudiagramm wurde erstellt, um den Zusammenhang zwischen diagnostischer Genauigkeit und der Gesamtzeit beim Üben im Vergleich zur Anzahl

**Tabelle 2: Fragen und mögliche Antworten für jeden Rhythmusstreifen.**

1. Wie hoch ist die ventrikuläre Rate? a. (Texteingabe einer Nummer)
2. Ventrikelrhythmus? a. Regelmäßig b. Regelmäßig mit fehlenden/extra Schlägen c. Unregelmäßig mit einem Muster d. Unregelmäßig ohne Muster oder unbestimmt
3. Werden P-Wellen abgelesen? a. Ja b. Nein
4. Verhältnis von P-Wellen zu QRS? a. Gleich b. Mehr P-Wellen c. Weitere QRS-Komplexe d. Keine P-Wellen
5. Sind P-Wellen alle gleichförmig? a. Ja b. Nein
6. P-Wellen, die zu den Ventrikeln geleitet werden? a. Ja b. Nein (P-Wellen vorhanden) c. Manchmal d. Keine P-Wellen
7. PR-Intervall? a. Normal b. Lang, konstant c. Lang, wechselnd d. Kurz e. Keine P-Wellen f. Nicht anwendbar (P-Wellen vorhanden)
8. QRS-Breite? a. Eng b. Breit c. Kein QRS
9. Ursprung/Ursprünge der Wellen? (Mehrere Antworten erlaubt) a. SA-Knoten b. Vorhöfe c. AV-Knoten d. Jede supraventrikuläre Stelle e. Ventrikel
10. Diagnose: (vgl. Tabelle 1)

der abgeschlossenen Module zu beobachten. Basierend auf der visuellen Betrachtung des Streudiagramms ergaben sich drei mathematische Funktionen: Gompertz-Funktion, Michaelis-Menten (MM)-Funktion und quadratische Funktion wurden als mögliche Kandidaten ausgewählt, um diese 2 Beziehungen darzustellen [40]. Die mit den Modellen verbundenen Koeffizienten wurden auf ihre statistische Signifikanz für die Anpassung an die Daten untersucht. Alpha wurde *a priori* auf 0,05 gesetzt. Akaike Informationskriterien (AIC) und die Korrelation zwischen beobachteten und vorhergesagten Messungen werden zur Messung der Güteanpassung der mathematischen Modelle verwendet.

## Ergebnisse

### Übungsumfang

Insgesamt wurden 384 Schüler zur Teilnahme eingeladen und 314 (82%) willigten ein. Unter den 298 (95%) zugelassenen Teilnehmern, welche die Vorbefragung abge-

schlossen haben, lag das Durchschnittsalter bei 24,9 (SD=4,2) Jahren und 54 % der Teilnehmer waren weiblich. 14 (4%) Schüler gaben an, dass sie zuvor Online-Übungsmodul verwendet hatten, um Rhythmusstreifen interpretieren zu können. Die durchschnittliche Häufigkeit, mit der jede der 14 Diagnosen pro Schüler geübt wurde, betrug 4,1 (SD=2,7), was 59 Rhythmusstreifen pro Studierenden entspricht (siehe Abbildung 1). Insgesamt 24 (8%) Studierenden übten nur das obligatorische Einzelmodul vor der Prüfung. Neun Studierenden haben das Pflichtmodul nicht vor der Prüfung und nach der Prüfung abgeschlossen. Achtundvierzig Schüler absolvierten 10 oder mehr Module; das entspricht  $\geq 140$  Rhythmusstreifen für jedes Modul. Die maximale Anzahl der von einem Studierenden absolvierten Module betrug 20, was 280 Rhythmusstreifen entspricht. Die Gesamtzahl der von allen 314 Schülern geübten Rhythmusstreifen betrug 18.466. Damit konnte auf 18.466 Feedbackfälle zurückgegriffen werden.

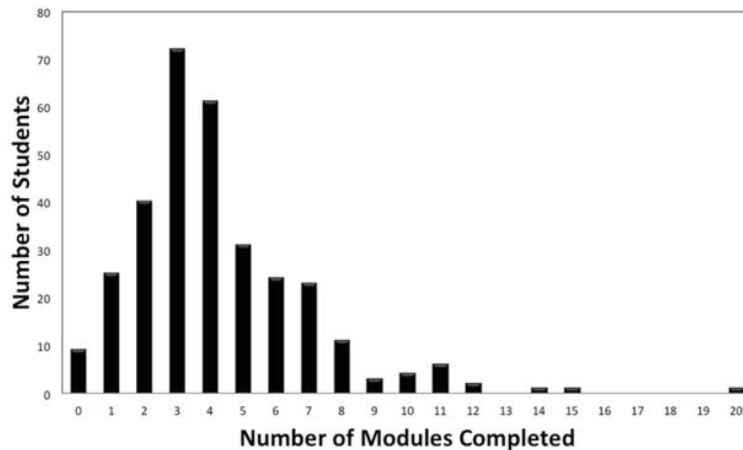


Abbildung 1: Die Anzahl der von jedem Studierenden absolvierten Module. Ein Modul enthält 14 Rhythmusstreifen-Untersuchungsfälle.

## Übungsleistung

Abbildung 2 (links und rechts) zeigt die Streudiagramme, die sich auf die Anzahl der abgeschlossenen Übungsmodule mit diagnostischer Genauigkeit und die pro Modul Übungszeit in zwei verschiedenen Einrichtungen während der Absolvierung der Übung beziehen. Es gab keine statistischen Unterschiede hinsichtlich der diagnostischen Genauigkeit zwischen beiden Einrichtungen während der Absolvierung der Übung. Es gab keine statistischen Unterschiede in der Übungszeit pro Modul zwischen den beiden Einrichtungen, außer für einen Zeitpunkt (bei Modul 3). Unterschiede in der diagnostischen Genauigkeit zwischen aufeinanderfolgenden Modulen zeigten statistisch signifikante Steigerungen zwischen den Modulen: 1 und 2; 2 und 3; nicht 3 und 4, sondern erneut 4 und 5, was darauf hindeutet, dass die Diagnosegenauigkeit durch die Module 1-3 und möglicherweise auch bis zum Modul 5 (vollständige statistische Werte gemäß Anhang 1) weiter gestiegen ist. Die Unterschiede in der Praxiszeit pro Modul haben sich zwischen aufeinanderfolgenden Modulen deutlich verringert: 1 und 2; bis hin zu den Modulen 7 und 8 einschließlich, was darauf hindeutet, dass die Geschwindigkeit in allen diesen Modulen weiter zugenommen haben.

## Prüfungsleistung

Die mathematische Funktion, welche die Lernkurve der diagnostischen Genauigkeit am besten approximiert, entspricht der Gompertz-Gleichung mit den folgenden Koeffizienten:  $Y \sim 88 * \exp(0,51 * \exp(0,47 * M))$ . Die Funktion, welche die gesamte Trainingszeitkurve am besten beschreibt, entspricht der Michaelis-Menten-Funktion mit den Koeffizienten:  $Y \sim 671 * M / (12,1 + M)$ . M stellt die Anzahl der abgeschlossenen Module dar. Die AIC Goodness of Fit Bewertung für diese beiden mathematischen Funktionen ergab p-Werte  $< 0,001$  für alle Koeffizienten in den Modulen. Diese Kurven werden verwendet, um den Arbeitsaufwand der Studierenden zu schätzen, der erforderlich ist, um ein vordefiniertes Leistungsniveau

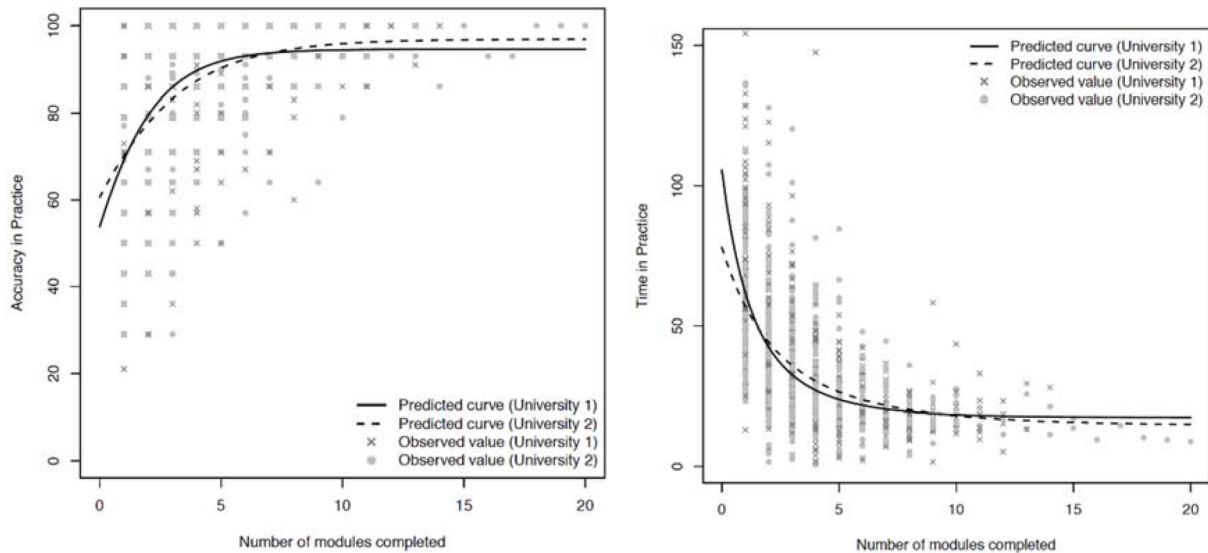
für die Prüfung zu erreichen. Ein zweistufiges Modell zum Auffinden der Übungszeit aus der erwarteten Genauigkeit ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Schätzung des Gompertz-Modells wird verwendet, um die entsprechende Anzahl von Modulen zu finden, die dann als Input für die Schätzung der Michaelis-Menten-Funktion verwendet wird, um die für die Praxis benötigte Zeit vorherzusagen. Tabelle 3 zeigt die gesamte Übungszeit und die erforderliche Anzahl der Module, die geübt wurden, um in der Prüfung eine Punktzahl von 70 bis 85% zu erreichen. In der Vorbefragung berichteten die Studierenden darüber, wie viel Zeit sie vor der Forschungsstudie damit verbracht hatten, die Interpretation von Rhythmusstreifen zu üben; werden die Studierenden nach ihrer Vorstudienpraxis sortiert, ließen sich keine statistischen Unterschiede in der Prüfungsleistung feststellen.

## Zufriedenheit der Studierenden

Basierend auf der am Ende der kardiovaskulären Kurse durchgeführten Umfrage gaben 174 (von 314 Zustimmenden) Studierende an, dass die Lernmodule effektiv (97%), effizient (97%) und angenehm (92%) sind (siehe Anhang 2). Die meisten Studierenden waren der Auffassung, dass ein Praxisbezug erforderlich ist, um das Interpretieren von EKGs zu erlernen (99%), dass sofortiges Feedback hilfreich war (95%) und dass sie daran interessiert waren, die gleiche Methode zum Erlernen anderer diagnostischer Fähigkeiten, wie Röntgen- und Ultraschallinterpretation, zu verwenden (99%).

## Arbeitsbelastung der Dozenten

In Bezug auf den Arbeitsaufwand des Dozenten für die Beantwortung von Feedback-E-Mails der Schüler wurden insgesamt 14 E-Mail-Fragen von Studierenden von McGill und 37 von Calgary eingereicht. Vergleicht man E-Mails mit den insgesamt geübten Fällen, so wurden 51 Feedback-E-Mails für 18.466 Praxisfälle eingereicht, was etwa einer E-Mail pro 360 geübten Fällen entspricht.



**Abbildung 2:** Links zeigt die diagnostische Genauigkeit während der Übungsphase zweier verschiedener medizinischen Einrichtungen bei der Interpretation des Rhythmusstreifens. Rechts zeigt die Übungszeit pro Modul. Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Schulen außer einem Zeitunterschied beim Modul #3, der wahrscheinlich nicht „klinisch“ signifikant ist.

**Tabelle 3:** Anzahl der abgeschlossenen Module und Gesamtübungszeit, die benötigt wird, um die vordefinierten Ziel-Diagnosegenauigkeiten zu erreichen.

Ziel-Diagnosegenauigkeit	Nummer der Module	Nummer der Fälle*	Zeit (min)
70 %	1,85	26	90
75 %	2,42	34	111
80 %	3,50	49	141
85 %	5,2	73	202

\* Es gibt 14 Fälle in einem Modul, sodass die Anzahl der Fälle gleich der Anzahl der Module x 14 ist.

## Diskussion

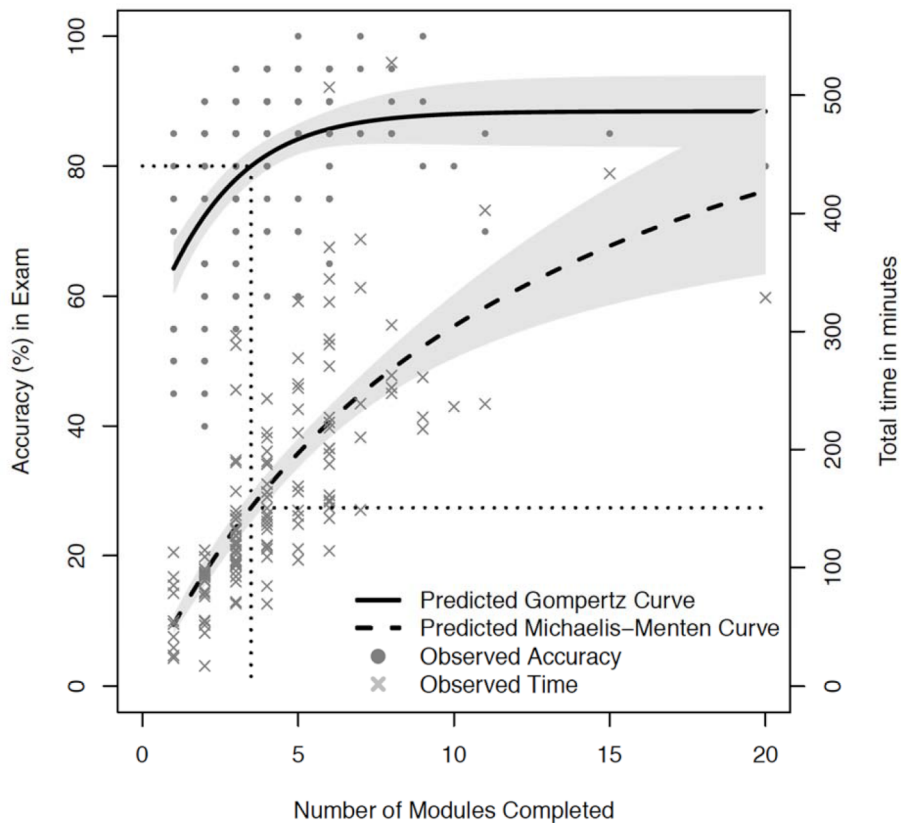
Unsere Daten zeigen, dass Medizinstudenten im ersten Jahr vor einer Rhythmusstreifenuntersuchung einen Mittelwert von 59 Rhythmusstreifen interpretiert haben. Insgesamt wurden 314 Studierenden an zwei verschiedenen medizinischen Fakultäten über 18.000 Feedback-Fälle zur Verfügung gestellt. Dies ist aus mehreren Gründen wichtig. Erstens wurden von Herausforderungen bei der Bereitstellung von Feedback für die bewusste Praxis (Deliberate Practice) berichtet [37]. Wir haben detailliert beschrieben, wie man zwei großen Kohorten von Medizinstudenten erfolgreich Feedback im Rahmen der bewussten Praxis geben könnte, um auf diese Weise einem in der medizinischen Lehrliteratur identifizierten Bedarf gerecht zu werden.

Zweitens zeigten unsere bisher unveröffentlichten lokalen Daten, dass, wenn das Üben nicht vorgeschrieben war und es keine Rhythmusstreifen-Prüfung gab, die Studierenden trotz starker Förderung und Ermutigung durch die Dozenten lediglich einen Mittelwert von nur 6 Übungs-

rhythmusstreifen erreichten [41]. Der Vergleich dieser Ergebnisse mit den Ergebnissen unserer aktuellen Studie, die Einführung eines obligatorischen Übungsmoduls und einer speziellen Rhythmusstreifen-Summenprüfung führte zu einer 9-fachen Steigerung des Praxisverhaltens der Studierenden. Die Studierenden waren bereit, fähig und motiviert, weit über das von den Kursleitern vorgeschriebene Arbeitspensum hinaus zu üben und absolvierten durchschnittlich 59 Übungs-rhythmusstreifen, auch, wenn nur 14 benötigt wurden.

Die spezielle Rhythmusstreifen-Summenprüfung war wahrscheinlich ein starker Motivator für das Verhalten der Studierenden in der Praxis. Andere Studien haben die positiven Auswirkungen von summativen Bewertungen speziell auf die Leistung der Studierenden auf die EKG-Interpretation beschrieben [42], [43]. Bei Vorklinik-Schulungsprogrammen wurden regelmäßige objektive Beurteilungen der EKG-Interpretationsfähigkeiten empfohlen [34]. Zusätzlich zu den prägenden Rückmeldungen haben Raupach et al. festgestellt, dass summatives Feedback die mittelfristige Aufrechterhaltung der EKG-





**Abbildung 3:** Die diagnostische Genauigkeit und die gesamte Übungszeit werden mit der Gesamtzahl der geübten Module verglichen. Die durchgezogene Linienkurve entspricht der Gompertz-Kurve, welche die diagnostische Genauigkeit schätzt. Die gestrichelte Kurve entspricht der Michaelis-Menten-Kurve, welche die gesamte Trainingszeit schätzt. Grau schattierte Bereiche stellen 95 % CI dar. Die horizontale und vertikale gestrichelte Linie zeigt eine exemplarische 80%ige diagnostische Genauigkeitsabbildung auf die geschätzte Anzahl von Modulen und die gesamte Praxiszeit, die benötigt wird, um dieses Kompetenzniveau zu erreichen. Siehe auch Tab. 3 für berechnete Werte.

Interpretationsfähigkeiten, unabhängig von der Unterrichtstechnik, erhöht; es sollte daher als wichtige Komponente für die Aufrechterhaltung solcher Fähigkeiten angesehen werden [44].

Die Lernkurve für die Interpretation von EKG-Rhythmusstreifen bei Medizinstudenten wurde bisher nicht quantifiziert. Eine Lernkurve ist eine grafische Darstellung, die eine Metrik von Zeit oder Aufwand mit der Leistung einer Fertigkeit verbindet [22]. Wir konnten zeigen, dass die diagnostische Genauigkeit und die Zeit, die mit dem Üben verbracht wurde, zwischen den Studierenden an zwei verschiedenen medizinischen Fakultäten sich sehr ähneln. Die Studierenden zeigten weiterhin eine Verbesserung sowohl der diagnostischen Genauigkeit als auch der Geschwindigkeit der Diagnose und übten bis zu 4 Module (56 Fälle). Der Wert von 56 Fällen unterstreicht die große Zahl von Praxisfällen, die den Studierenden zur Verfügung gestellt werden sollten, damit diese weiterhin die Möglichkeit haben zu üben, während sie sich gleichzeitig verbessern. Es ist wichtig zu erkennen, wann die Lernkurve ihre Asymptote erreicht hat, um anzuzeigen, wann der Lernprozess höchstwahrscheinlich aufgehört hat.

Anhand der Kurven in Abbildung 3 kann die Anzahl der EKG-Fälle und die Zeit, die benötigt wird, um bei Medizinstudenten im ersten Jahr ein vorgegebenes Kompetenzniveau zu erreichen, bestimmt werden (siehe Tabelle 3).

Diese Informationen sind für die Studierenden wertvoll, um ihnen dabei behilflich zu sein, ihre Studienzeit zu planen und realistische Leistungsziele zu setzen. Die Ergebnisse der Lernkurvenanalyse können auch als Orientierungshilfe für die Curriculumsentwicklung dienen; zunächst kann ein Kompetenzstandard für die diagnostische Genauigkeit gewählt werden; mithilfe der Lernkurve kann geschätzt werden, wie viel bewusste Praxis für die Studierenden erforderlich ist. Wenn beispielsweise der Kompetenzstandard auf eine diagnostische Genauigkeit von 75% festgelegt wird, werden 34 Praxisfälle und 111 Minuten benötigt, damit der durchschnittliche Medizinstudent dieses Leistungsniveau erreicht. Wir sind der festen Überzeugung, dass die Verantwortung für die Bereitstellung der erforderlichen Praxis und des Feedbacks zur Erlangung medizinischer Fähigkeiten bei der Medizinischen Fakultät und ihren Lehrpersonen liegt, anstatt dies den Studierenden aufrechtzuerlegen.

Frühere Forderungen nach einer Änderung der Art und Weise, wie das Fach EKG-Interpretation gelehrt werden sollte, legen nahe, dass mehr Übungsmöglichkeiten erforderlich sind [2]. Die CDIM-Umfrage 2013 der internen Medizinischen Lehrprogramme berichtete über die Anzahl von 12 Kanal-EKGs, die Studierenden in den Praktika im dritten Jahr unter Aufsicht formal interpretiert hatten [1]. Nur 37% der Studierenden an medizinischen Fakultäten

interpretierten formal mehr als zehn 12-Kanal-EKGs während ihrer Praktika in der Inneren Medizin [1]. Alle anderen Befragten gaben an, dass ihre Studierenden weniger EKGs interpretiert hatten, oder dass diese Frage nicht beantwortet wurde. Die Daten für die EKG-Schulung vor Aufnahme der Ausbildungsphase, d.h. die von uns untersuchte Population, liegen nur spärlich vor.

Unsere Studie untersuchte die Interpretation von Rhythmusstreifen und keine 12 Kanal-EKGs. Die Interpretation von 12-Kanal-EKGs ist jedoch komplexer als die von Rhythmusstreifen und erfordert daher voraussichtlich noch mehr Übezeit als die von Rhythmusstreifen, um wirkliche Kompetenz zu erlangen. Unsere Ergebnisse, kombiniert mit den Ergebnissen der CDIM-Umfrage, deuten möglicherweise darauf hin, dass die Bedürfnisse der Studierenden nach EKG-Praxis an vielen medizinischen Fakultäten nicht erfüllt werden. Um die Kluft zwischen dem, was den Studierenden zur Verfügung gestellt wird, und dem, was von den Studierenden benötigt wird, weiter zu verdeutlichen, empfehlen die ACC/AHA-Leitlinien für das Erlernen von 12 Kanal-EKGs, dass die Lernphase mindestens 500 überwachte Interpretationen umfassen sollte [45], obgleich die Beweise, auf denen die Empfehlung fußt, unklar sind.

Eine der Schlüsselkomponenten der Kompetenzentwicklung ist das Feedback [46]. Formatives Feedback kann den Studierenden helfen, sich selbst zu überwachen und festzustellen, ob sie die von ihrer Schule definierten Kompetenzstandards erfüllt haben [47], [48]. Die Qualität und Art des Feedbacks hat einen starken Einfluss auf die Motivation [49] und wird als am nützlichsten erachtet, wenn Ausbilder eine aktive Rolle im Lernprozess übernehmen [50]. Fehlendes Feedback oder mangelnde Unterstützung können zu geringer Motivation und vorzeitiger Beendigung von selbstgesteuerten Kursen führen (49). Daher sollte eine selbstgesteuerte Lernressource die direkte Beteiligung von Dozenten beinhalten. Unser Lernwerkzeug bot eine gemischte Form des Feedbacks an, bestehend aus 3 verschiedenen Komponenten des automatisierten Feedbacks, und eine E-Mail-Funktion, die eine effiziente Einbindung des Schulenden vor Ort ermöglichte. Es gibt logistische Herausforderungen, den Studierenden ein individuelles Feedback zu geben, wenn es viele Studierenden und wenig Dozenten gibt. Die erste Überlegung richtet sich auf die Skalierbarkeit und Machbarkeit. Ein Beispiel: Für eine Klasse von 100 Studierenden, bei der jeder Studierende 50 Übungs-EKGs absolviert, würde ein Feedback von 5.000 Mal erforderlich sein. Um unserer Gruppe von 314 Studierenden eine bewusste Praxis zu ermöglichen, waren 18.466 Fälle von Praxis und Feedback erforderlich. Da Computeralgorithmen automatisiertes Feedback liefern, war der Arbeitsaufwand für die Dozenten gering. Die Arbeitsbelastung durch zusätzliches Feedback, das die Studierenden per E-Mail von ihren Dozenten vor Ort angeforderten, lag im Durchschnitt bei 25 E-Mails pro Dozent und wurde nicht als überwältigend angesehen. Anders betrachtet: Es gab für jede 360 geübten Fälle eine Feedback-E-Mail-Frage.

Ein weiterer Vorteil des automatisierten Feedbacks ist die Konsistenz; alle Lernenden erhalten die gleiche Qualität des Feedbacks, da der Einfluss der Assessorvariabilität aus dem Prozess entfernt wird. Darüber hinaus kann die Qualität des Feedbacks im Laufe der Zeit gesteigert werden, da Leistungsdaten der Schüler gesammelt und analysiert werden und häufige Fehler identifiziert werden. Diese Informationen decken Änderungen an Falldiskussionen auf, sodass häufige Fehler direkt und präventiv behoben werden können.

Eine positive emotionale Reaktion auf ein Lernumfeld erleichtert das Engagement der Studierenden [51], [52]. Unsere Umfragedaten bestätigten, dass 92% der Studierenden den bewussten Übungs-Lernprozess mit einem hohen Maß an „Spaß“ verbanden oder diesen als „ein wenig angenehm“ einschätzten. Die Erfahrungen der Studierenden können auch durch ihre Wahrnehmung positiv beeinflusst worden sein, dass die Lernressourcen sowohl effektiv als auch effizient waren. Darüber hinaus trug individualisiertes Feedback wahrscheinlich auch zur Zufriedenheit und Leistung der Studierenden bei, da die Studierenden angaben, dass sofortiges Feedback entweder „unbedingt erforderlich“ (95%) oder „hilfreich“ (4%) gewesen war.

Zu den Stärken dieser Studie gehört die unauffällige Erfassung von Lernanalysen während der Kernaktivitäten des Lehrplans, wodurch die Verzerrung der Teilnehmer minimiert und die Datenerfassung maximiert wird. Der Rückgriff auf Daten von 2 medizinischen Fakultäten erhöht die Verallgemeinerbarkeit unserer Ergebnisse. Die Studie war einfach zu implementieren und wird für zukünftige Studien anderer diagnostischer Fähigkeiten skalierbar sein.

Es gibt zahlreiche Einschränkungen innerhalb unserer Forschungsstudie. Ein vergleichendes experimentelles Design ist methodisch stärker, aber das Fehlen einer Kontrollgruppe, mit der wir das Gleichgewicht rechtfertigen konnten, war nicht möglich. Es existierte keine vorherige Methode zur Bereitstellung von bewusster Praxis an beiden medizinischen Fakultäten. Zudem konnten wir die Studierenden nicht in eine Gruppe randomisieren, welche nicht übten; daher ist unsere Studie als eine beobachtende Studie zu betrachten.

Unsere unabhängige Variable wurde auf der Grundlage von Modulfertigstellungen und nicht auf der Grundlage von Einzelfallabschlüssen quantifiziert. Hätten wir unsere Datenerhebung auf abgeschlossene Einzelfälle anstelle der abgeschlossenen Module strukturiert, hätten wir Daten mit höherer Genauigkeit erhalten. Da wir diese Einschränkung nach der Datenerfassung erkannten, haben wir die Datenerfassungssoftware so modifiziert, dass zukünftige Projekte die Daten fallweise analysieren können.

Nach der Analyse stellen wir fest, dass unsere digitale Übungsbibliothek wahrscheinlich zu klein ist, um die Bedürfnisse eines durchschnittlichen Studierenden zu erfüllen, sofern wir eine diagnostische Genauigkeit von 80% oder mehr anstreben. Darüber hinaus schafft die Aufteilung der Fälle in drei getrennte Module wahrscheinlich

künstliche und möglicherweise bedeutungslose Stoppunkte für den Lernenden; es wäre wahrscheinlich besser, alle Übungsfälle in ein Modul zu integrieren und auf weit über 50 Übungsfälle zurückzugreifen, um sicherzustellen, dass es am langsameren Ende der Lernkurve genügend Fälle für die Studierenden gibt. Da wir insgesamt 42 Einzelfälle haben, bleiben wir hinter diesem Ziel zurück. Dies stellt eine Einschränkung unserer Studie dar, denn Studierenden, die mehr als 42 Fälle übten, wiederholten Fälle, die sie zuvor geübt hatten.

Wir haben die kurzfristige Beibehaltung der Rhythmusstreifen-Interpretation gemessen; der genaue Zeitpunkt, zu dem die Studierenden die Praxis abgeschlossen haben, wurde nicht gemessen, sondern war in einem 10-wöchigen Lernblock enthalten. Es ist wahrscheinlich, dass zahlreiche Übungen innerhalb von 2-3 Wochen nach der Prüfung stattgefunden haben. Wir können unsere Ergebnisse nicht auf die langfristige Bindung hochrechnen, hoffen aber, die Studierenden zu einem späteren Ausbildungszeitpunkt erneut (höheres Semester) bewerten zu können und unsere Analyse mit einer langfristigen (2 Jahre) Bindung zu wiederholen.

Wir untersuchten die Leistung innerhalb der ACLS-Ebene Rhythmusstreifen-EKG-Interpretation und diese Ergebnisse können nicht auf die volle 12-Kanal-EKG-Interpretation hochgerechnet werden, was mehr Analyse und oft mehrere koexistierende Diagnosen erfordert.

Wichtig ist, dass die Studierenden die EKG-Rhythmen ohne klinischen Kontext interpretierten; die diagnostische Interpretation könnte sich ändern, wenn Patienteninformationen zur Verfügung gestellt werden [53], [54].

Nach unserem Kenntnisstand haben unsere Studierenden in erster Linie ein Lernwerkzeug zur EKG-Interpretationsübung verwendet. Daher können wir unsere Ergebnisse nicht auf andere Lernwerkzeuge hochrechnen; es wäre jedoch sehr interessant, eine Steigung der Lernkurve für verschiedene Werkzeuge zu vergleichen, damit das Werkzeug, welches das schnellste Lernen mit geringstem Aufwand ermöglicht, identifiziert werden kann. Darüber hinaus ist unser Bewertungsinstrument (die Rhythmusstreifen-Prüfung) noch nicht formal validiert worden.

Eine weitere Einschränkung unserer Studie stellt die fehlende Analyse jedes einzelnen Lernenden dar; wir berichten über die Leistungsmöglichkeit einer größeren Anzahl von Studierenden. Nicht alle Lernenden folgen der gleichen Lernkurve; tatsächlich beschreibt der Mittelwert der Schülerleistung selten die Leistung eines einzelnen Schülers [55].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wir einer großen Gruppe von Medizinstudenten im ersten Studienjahr erfolgreich bewusste Praxis zur Verfügung gestellt haben und unsere Daten quantifizieren eine Lernkurve für die Interpretation von Rhythmusstreifen auf ACLS-Ebene mit einem speziellen Online-Lernmodul. Diese Ergebnisse können bei der curricularen Ausgestaltung des Themas Interpretation von EKG-Rhythmusstreifen behilflich sein, einer erforderlichen Fähigkeit zur Behandlung eines Herzstillstands.

## Anmerkungen

Jason Waechter ist der Gründer von [teachingmedicine.com](http://teachingmedicine.com). Die für dieses Projekt verwendeten Module sind Open Access und frei zugänglich.

## Ethische Anerkennung

Das University of Calgary Conjoint Health Research Ethics Board hat diese Forschungsstudie genehmigt (REB14-0654\_MOD2). Die University of McGill hat diese Forschungsstudie genehmigt (IRB-Studiennummer A07-E50-15B).

## Frühere Präsentationen

Posterpräsentation mit dem Titel "Learning Curves for ECG Interpretation: Correlating Deliberate Practice with Performance." Präsentiert auf der Canadian Conference for Medical Education (CCME) 2017.

## Danksagung

Wir danken Dr. Rachel Ellaway und Dr. Martin Pusic für die Bearbeitung des Manuskripts und die Unterstützung des Projekts.

## Interessenkonflikt

Die Autoren erklären, dass sie keine Interessenkonflikte im Zusammenhang mit diesem Artikel haben.

## Anhänge

Verfügbar unter

<https://www.egms.de/de/journals/zma/2019-36/zma001248.shtml>

1. Anhang\_1.pdf (64 KB)  
Statistische Analyse von Praxisdaten
2. Anhang\_2.pdf (94 KB)  
Vorbefragung von 298 Studierenden durchgeführt

## Literatur

1. Jablonover RS, Stagnaro-Green A. ECG as an Entrustable Professional Activity: CDIM Survey Results, ECG Teaching and Assessment in the Third Year. *Am J Med.* 2016;129(2):226-230. DOI: 10.1016/j.amjmed.2015.10.034
2. Jablonover RS, Lundberg E, Zhang Y, Stagnaro-Green A. Competency in Electrocardiogram Interpretation Among Graduating Medical Students. *Teach Learn Med.* 2014;26(3):279-284. DOI: 10.1080/10401334.2014.918882
3. Kopec G, Magon W, Holda M, Podolec P. Competency in ECG Interpretation Among Medical Students. *Med Sci Monit* 2015;21:3386-3394. DOI: 10.12659/MSM.895129

4. Pinkerton RE, Francis CK, Ljungquist KA, Howe GW. Electrocardiographic training in primary care residency programs. *JAMA*. 1981;246(2):148-150. DOI: 10.1001/jama.1981.03320020040021
5. Sur DK, Kaye L, Mikus M, Goad J, Morena A. Accuracy of electrocardiogram reading by family practice residents. *Fam Med*. 2000;32(5):315-319.
6. Goodacre S, Webster A, Morris F. Do computer generated ECG reports improve interpretation by accident and emergency senior house officers? *Postgrad Med J*. 2001;77(909):455-457. DOI: 10.1136/pmj.77.909.455
7. Higuera J, Gómez-Talkavera S, Ganadas V, Bover R, Losas M, Gómez-Polo JC, Olmos C, Fernandez C, Villacastin J, Macaya C. Expertise in Interpretation of 12-Lead Electrocardiograms of Staff and Residents Physician: Current Knowledge and Comparison between Two Different Teaching Methods. *J Caridol Curr Res*. 2016;5(3):00160. DOI: 10.1546/jccr.2016.05.00160
8. Hartman ND, Wheaton NB, Williamson K, Quattromani EN, Branzetti JB, Aldeen AZ. A Novel Tool for Assessment of Emergency Medicine Resident Skill in Determining Diagnosis and Management for Emergent Electrocardiograms: A Multicenter Study. *J Emerg Med*. 2016;51(6):697-704. DOI: 10.1016/j.jemermed.2016.06.054
9. Eslava D, Dhillon S, Berger J, Homel P, Bergmann S. Interpretation of electrocardiograms by first-year residents: the need for change. *J Electrocardiol*. 2009;42(6):693-697. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2009.07.020
10. Morrison WG, Swann IJ. Electrocardiograph interpretation by junior doctors. *Arch Emerg Med*. 1990;7(2):108-110. DOI: 10.1136/emj.7.2.108
11. Jayes RL Jr, Larsen GC, Beshansky JR, D'Agostino RB, Selker HP. Physician electrocardiogram reading in the emergency department – accuracy and effect on triage decisions: findings from a multicenter study. *J Gen Intern Med*. 1992 Jul-Aug;7(4):387-92. DOI: 10.1007/bf02599153
12. Kuhn M, Morgan MT, Hoffman JR. Quality assurance in the emergency department: evaluation of the ECG review process. *Ann Emerg Med*. 1992;21(1):10-15. DOI: 10.1016/S0196-0644(05)82229-2
13. Kohn LT, Corrigan JM, Donaldson MS. *To Err is Human: Building a Safer Health System*. Washington (DC): National Academies Press (US); 2000.
14. Snoey ER, Housset B, Guyon P, ElHaddad S, Valty J, Hericord P. Analysis of emergency department interpretation of electrocardiograms. *J Acc Emerg Med*. 1994;11(3):149-153. DOI: 10.1136/emj.11.3.149
15. Eslava D, Dhillon S, Berger J, Homel P, Bergmann S. Interpretation of electrocardiograms by first-year residents: the need for change. *J Electrocard*. 2009;42(6):693-697. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2009.07.020
16. Barsuk JH, Cohen ER, Caprio T, Mcgaghie WC, Simuni T, Wayne DB. Simulation-based education with mastery learning improves residents' lumbar puncture skills. *Neurol*. 2012;79(2):132-137. DOI: 10.1212/WNL.0b013e31825dd39d
17. Dlouhy BJ, Rao RC. Surgical skill and complication rates after bariatric surgery. *New Engl J Med*. 2014;370(3):285-. DOI: 10.1056/NEJMc1313890
18. Barsuk JH, Ahyia SN, Cohen ER, Mcgaghie WC, Wayne DB. Mastery learning of temporary hemodialysis catheter insertion by nephrology fellows using simulation technology and deliberate practice. *Am J Kidney Dis*. 2009;54(1):70-76. DOI: 10.1053/j.ajkd.2008.12.041
19. Cohen ER, Mcgaghie WC, Wayne DB, Lineberry M, Yudkowsky R, Barsuk JH. Recommendations for Reporting Mastery Education Research in Medicine (ReMERM). *Acad Med*. 2015;90(11):1509-1514. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000933
20. Mcgaghie WC, Barsuk JH, Wayne DB. Mastery Learning With Deliberate Practice in Medical Education. *Acad Med*. 2015;90(11):1575. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000876
21. Ericsson KA. Acquisition and maintenance of medical expertise: a perspective from the expert-performance approach with deliberate practice. *Acad Med*. 2015;90(11):1471-1486. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000939
22. Pusic M, Pecaric M, Boutis K. How Much Practice Is Enough? Using Learning Curves to Assess the Deliberate Practice of Radiograph Interpretation. *Acad Med*. 2011;86(6):731-736. DOI: 10.1097/ACM.0b013e3182178c3c
23. Ericsson KA. Deliberate practice and the Acquisition and Maintenance of Expert Performance in Medicine and Related Domains. *Acad Med*. 2004;79(10 Suppl):S70-S1. DOI: 10.1097/00001888-200410001-00022
24. Kirkman MA. Deliberate practice, domain-specific expertise, and implications for surgical education in current climates. *J Surg Educ*. 2013;70(3):309-317. DOI: 10.1016/j.jsurg.2012.11.011
25. Mcgaghie WC, Issenberg SB, Cohen ER, Barsuk JH, Wayne DB. Does Simulation-Based Medical Education With Deliberate Practice Yield Better Results Than Traditional Clinical Education? A Meta-Analytic Comparative Review of the Evidence. *Acad Med*. 2011;86(6):706-711. DOI: 10.1097/ACM.0b013e318217e119
26. Duckworth AL, Kirby TA, Tsukayama E, Berstein H, Ericsson KA. Deliberate Practice Spells Success: Why Grittier Competitors Triumph at the National Spelling Bee. *Soc Psychol Person Sci*. 2011;2(2):174-181. DOI: 10.1177/1948550610385872
27. Mcgaghie WC, Issenberg SB, Cohen ER, Barsuk JH, Wayne DB. Medical Education Featuring Mastery Learning With Deliberate Practice Can Lead to Better Health for Individuals and Populations. *Acad Med*. 2011;86(11):e8-e9. DOI: 10.1097/ACM.0b013e3182308d37
28. Macnamara BN, Moreau D, Hambrick DZ. The Relationship Between Deliberate Practice and Performance in Sports. *Perspect Psychol Sci*. 2016;11(3):333-350. DOI: 10.1177/1745691616635591
29. Macnamara BN, Hambrick DZ, Oswald FL. Deliberate Practice and Performance in Music, Games, Sports, Education, and Professions: A Meta-Analysis. *Psychol Sci*. 2014;25(8):1608-1618. DOI: 10.1177/0956797614535810
30. Wayne DB, Butter J, Siddall VJ, Fudala MJ, Wade LD, Feinglass J, McGaghie WC. Mastery learning of advanced cardiac life support skills by internal medicine residents using simulation technology and deliberate practice. *J Gen Intern Med*. 2006;21(3):251-256. DOI: 10.1111/j.1525-1497.2006.00341.x
31. Barsuk JH, Cohen ER, Vozenilek JA, O'Connor LM, Mcgaghie WC, Wayne DB. Simulation-based education with mastery learning improves paracentesis skills. *J Grad Med Educ*. 2012;4(1):23-27. DOI: 10.4300/JGME-D-11-00161.1
32. O'Brien KE, Cannarozzi ML, Torre DM, Mechaber AJ, Durning SJ. Training and Assessment of ECG Interpretation Skills: Results From the 2005 CDIM Survey. *Teach Learn Med*. 2009;21(2):111-115. DOI: 10.1080/10401330902791255
33. Englander R, Flynn T, Call S, Carraccio C, Cleary L, Fulton TB, et al. Toward Defining the Foundation of the MD Degree: Core Entrustable Professional Activities for Entering Residency. *Acad Med*. 2016;91(10):1352-1358. DOI: 10.1097/ACM.0000000000001204

34. Salerno SM, Alguire PC, Waxman HS. Competency in Interpretation of 12-Lead Electrocardiograms: A Summary and Appraisal of Published Evidence. *Ann Intern Med.* 2003;138(9):751-760. DOI: 10.7326/0003-4819-138-9-200305060-00013
35. Ringsted C, Hodges B, Scherpbier A. 'The research compass': An introduction to research in medical education: AMEE Guide No. 56. *Med Teach.* 2011;33(9):695-709. DOI: 10.3109/0142159X.2011.595436
36. Fleishman EA. On the relation between abilities, learning, and human performance. *Am Psychol.* 1972;1017-1032. DOI: 10.1037/h0033881
37. Eppich WJ, Hunt EA, Duval-Arnould JM, Siddall VJ, Cheng A. Structuring Feedback and Debriefing to Achieve Mastery Learning Goals. *Acad Med.* 2015;90(11):1501-1508. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000934
38. Team RC. R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2014.
39. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D. *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models.* 2018.
40. Paine CET, Marthews TR, Vogt DR, Purves D, Rees M, Hector A, Turnball LA. How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. *Method Ecol Evol.* 2011;3(2):245-256. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2011.00155.x
41. Waechter J. Unpublished data from University of Calgary, Undergraduate Medical School, years 2014-2017. Calgary: University of Calgary; 2017.
42. Raupach T, Brown J, Anders S, Hasenfuss G, Harendza S. Summative assessments are more powerful drivers of student learning than resource intensive teaching formats. *BMC Med.* 2013;11(1):61. DOI: 10.1186/1741-7015-11-61
43. Raupach T, Hanneforth N, Anders S, Pukrop T, Th J ten Cate O, Harendza S. Impact of teaching and assessment format on electrocardiogram interpretation skills. *Med Educ.* 2010;44(7):731-740. DOI: /10.1111/j.1365-2923.2010.03687.x
44. Raupach T, Andresen JC, Meyer K, Strobel L, Koziolok M, Jung W, Brown J, Anders S. Test-enhanced learning of clinical reasoning: a crossover randomised trial. *Med Educ.* 2016;50(7):711-720. DOI: 10.1111/medu.13069
45. Kadish AH, Buxton AE, Kennedy HL, Knight BP, Mason JW, Schuger CD, Tracy CM, Winters WL Jr, Boone AW, Elnicki M, Hirshfeld JW Jr, Lorell BH, Rodgers GP, Tracy CM, Weltz HH; American College of Cardiology/American Heart Association/American College of Physicians-American Society of Internal Medicine Task Force; International Society for Holter and Noninvasive Electrocardiology. ACC/AHA clinical competence statement on electrocardiography and ambulatory electrocardiography: A report of the ACC/AHA/ACP-ASIM task force on clinical competence (ACC/AHA Committee to develop a clinical competence statement on electrocardiography and ambulatory electrocardiography). *Circulation.* 2001;104(25):3169-3178. DOI: 10.1161/circ.104.25.3169
46. Mitchell T, Chen SY, Macredie RD. The relationship between web enjoyment and student perceptions and learning using a web-based tutorial. *Learn Media Technol.* 2005;30(1):27-40. DOI: 10.1080/13581650500075546
47. Harlen W, Crick RD. A systematic review of the impact of Summative assessment and tests on students' motivation for Learning (EPPI-Centre Review, version 1.1\*). *Research Evidence in Education Library.*: EPPI Center; 2002.
48. Pusic MV, Chiaramonte R, Gladding S, Andrews JS, Pecaric MR, Boutis K. Accuracy of self-monitoring during learning of radiograph interpretation. *Med Educ.* 2015;49(8):838-846. DOI: 10.1111/medu.12774
49. Orrell J. Feedback on learning achievement: rhetoric and reality. *Teach High Educ.* 2006;11(4):441-456. DOI: 10.1080/13562510600874235
50. Ericsson KA, Krampe RT, Tesch-Römer C. The role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance. *Psychol Rev.* 1993;100(3):363-406. DOI: 10.1037/0033-295X.100.3.363
51. Malone TW. Toward a theory of intrinsically motivating instruction. *Cogn Sci.* 1981;5(4):333-369. DOI: 10.1207/s15516709cog0504\_2
52. Huang WH, Soman D. A Practitioner's Guide to Gamification of Education. *Research Report Series Behavioural Economics in Action.* Toronto: University of Toronto, Rotman School of Management; 2013.
53. Grum CM, Gruppen LD, Woolliscroft JO. The influence of Vignettes on EKG Interpretation by Third-year Students. *Acad Med.* 1993;68(10 Suppl):S61-63. DOI: 10.1097/00001888-199310000-00047
54. Hatala R, Norman GR, Brooks LR. Impact of a clinical scenario on accuracy of electrocardiogram interpretation. *J Gen Intern Med.* 1999;14(2):126-129. DOI: 10.1046/j.1525-1497.1999.00298.x
55. Pusic MV, Boutis K, Hatala R, Cook DA. Learning Curves in Health Professions Education. *Acad Med.* 2015;90(8):1034-1042. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000681

**Korrespondenzadresse:**

Clin. Associate Prof. Jason Waechter, MD  
University of Calgary, Depts. of Critical Care and  
Anesthesiology, 1403 29 St NW, Calgary (Alberta),  
Kanada  
jason.waechter@ahs.ca

**Bitte zitieren als**

Waechter J, Reading D, Lee CH, Walker M. Quantifying the medical student learning curve for ECG rhythm strip interpretation using deliberate practice. *GMS J Med Educ.* 2019;36(4):Doc40. DOI: 10.3205/zma001248, URN: urn:nbn:de:0183-zma0012482

**Artikel online frei zugänglich unter**

<https://www.egms.de/en/journals/zma/2019-36/zma001248.shtml>

**Eingereicht:** 29.10.2018

**Überarbeitet:** 07.04.2019

**Angenommen:** 28.05.2019

**Veröffentlicht:** 15.08.2019

**Copyright**

©2019 Waechter et al. Dieser Artikel ist ein Open-Access-Artikel und steht unter den Lizenzbedingungen der Creative Commons Attribution 4.0 License (Namensnennung). Lizenz-Angaben siehe <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.