

# Neue Möglichkeiten durch Funksensoren

Stefan Scheler, Thomas Wilhelm

## 1. Vorteile der Funkübertragung

Durch die kabellose Übertragung von Messwerten an einen Computer ergeben sich beim Aufbau und bei der Durchführung von Experimenten einige Vorteile. Die Funkübertragung erleichtert die Messwernerfassung bei Drehbewegungen und ermöglicht störungsfreie Beschleunigungsmessungen. Außerdem sind dadurch Temperatur- und Druckmessungen in abgeschlossenen Systemen möglich und es können Parallelexperimente durchgeführt werden, die an einem einzigen Rechner ausgewertet werden.

Bei Messungen an bewegten Körpern mussten bisher die Daten eines mitgeführten Sensors durch ein Kabel zum Computer übertragen werden oder die Bewegung wurde z.B. durch Fäden an einen ruhenden Sensor übertragen. Durch ein mitgeführtes Kabel oder einen Faden wird die zu untersuchende Bewegung aber gestört, was sich nur durch aufwändige Versuchsaufbauten minimieren lässt. Aus diesen Gründen gibt es mehrere Vorschläge um Bewegungen berührungslos zu vermessen. In solchen Messungen mit einem Ultraschall- oder Lasersensor können zunächst nur Abstände direkt gemessen werden. Auch durch Videoanalyse wird zunächst nur der Ort eines Objektes aufgezeichnet. Interessiert man sich für die Beschleunigung eines Körpers, muss diese erst durch zweifaches Ableiten berechnet werden, was insbesondere bei der Videoanalyse zu sehr ungenauen und schwankenden Beschleunigungswerten führt. Mit Ultraschall- oder Laserabstandssensoren können darüber hinaus nur eindimensionale Bewegungen aufgezeichnet werden.

Eine weitere Stärke von Funksensoren ist die Möglichkeit, auch Messungen in abgeschlossenen Systemen durchzuführen. So können z.B. problemlos quantitative Experimente unter der Vakuumlampe oder im Kühlschrank durchgeführt werden.

Für die Analyse von Bewegungen aus dem Alltag und Sport, die einen großen Bewegungsradius benötigen, sind Funksensoren besser geeignet als entsprechende Sensoren mit langen Kabeln. Die hierfür ebenfalls geeignete Alternative der Videoanalyse hat die Nachteile, dass zunächst wieder nur der Ort direkt gemessen werden kann und nicht immer eine geeignete Kameraposition möglich ist.

Für die in diesem Beitrag vorgestellten Beispiele wurden die *Pasport*-Sensoren von *Pasco* mit dem *AirLink* und der Software *DataStudio* sowie das Sensorsystem *Cobra4* von *Phywe* mit der Software *measure* verwendet. Ein spezieller Vorteil des Funksystems *Cobra4* ist die Möglichkeit, mehrere Sensoren an einem Computer zu verwenden. So können Schülerexperimente an einem einzigen gemeinsamen Rechner ausgewertet werden, was vor allem dann von Vorteil ist, wenn nur wenige Rechner zur Verfügung stehen, oder die Schülerversuche Teile eines gemeinsamen Parallelexperiments sind.

Bei einigen Experimenten kann ein Kabel nicht nur stören, sondern auch ein Unfallrisiko darstellen. Das ist zum Beispiel bei Experimenten, die nicht direkt neben dem Computer durchgeführt werden der Fall, wie die Alltagsbewegungen aus Abschnitt 2.6 oder Versuche mit einer Kraftmessplatte am Boden. Durch die Funkübertragung kann daher bei solchen Experimenten auch der Unfallschutz verbessert werden.

## 2. Beispiele für Experimente mit Funksensoren

Um die Möglichkeiten von Funksensoren zu untersuchen, wurden mehrere Experimente durchgeführt, welche die Vorteile der Funkübertragung ausnutzen. Die Stärken der kabellosen Übertragung werden besonders bei Versuchen aus der Mechanik deutlich.

### 2.1 Erfassen von Gleit- und Rollreibung durch Beschleunigungsmessung

Mit einem Beschleunigungssensor kann die Geschwindigkeitsänderung während einer Gleit- oder Rollphase ausgewertet und so der entsprechende Reibungskoeffizient bestimmt werden. Dazu muss der Sensor am zu untersuchenden Körper angebracht und die Beschleunigung aufgezeichnet werden.

Im Modell der Coulomb-Reibung, das für Bewegungen eines Körpers auf fester, ebener Unterlage ohne Schmiermittel in guter Näherung gilt, ist die Gleitreibungskraft  $\vec{F}_{GR}$  unabhängig von der Geschwindigkeit und proportional zur Normalkraft  $\vec{F}_N$ . Wird der *Cobra4*-Sensor auf einer ebenen Oberfläche angeschoben und



Abb. 1: Beschleunigung beim Anschieben ( $t = 1,65$  s bis  $t = 2,0$  s) und Gleiten ( $t = 2,0$  s bis  $t = 2,45$  s) des Beschleunigungssensors in Bewegungsrichtung

kann dann gleiten, ergibt sich ein Beschleunigungsverlauf wie in Abbildung 1. Zwischen  $t = 2,0$  s und  $t = 2,45$  s gleitet der Sensor und die Beschleunigung ist wie erwartet nahezu konstant.

Aus  $\vec{F}_{GR} = \vec{\mu}_G \cdot \vec{F}_N$  folgt  $\mu_G = \frac{|\vec{a}_{GR}|}{g}$ . Daher lässt sich aus dem Mittelwert der Beschleunigung

$\vec{a}_{GR}$  in diesem Intervall leicht der Gleitreibungskoeffizient  $\mu_G$  berechnen.

Ebenso kann ein Rollreibungskoeffizient durch eine Beschleunigungsmessung bestimmt werden. Dazu wird der Sensor auf einem Experimentierwagen befestigt (vgl. Abb. 2). Dieser wird angestoßen und kommt aufgrund der Reibung wieder zum Stehen. Dabei ergibt sich in Bewegungsrichtung eine Beschleunigung wie in Abbildung 3.

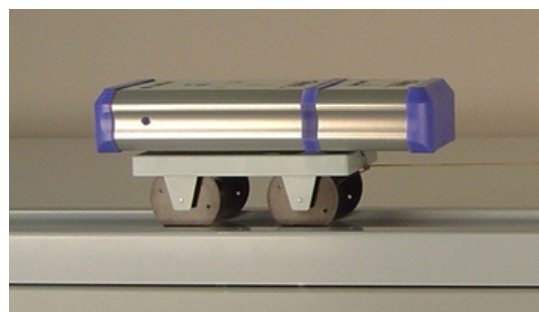


Abb. 2: Cobra4-Beschleunigungssensor auf einem Experimentierwagen

Auch hier ist die Beschleunigung  $\vec{a}_{RR}$  bis kurz vor dem Stillstand konstant und der Rollreibungskoeffizient  $\mu_R$  ergibt sich aus dem Mittelwert in diesem Intervall durch

$$\mu_G = \frac{|\vec{a}_{RR}|}{g}.$$

Diese beiden Versuche zur Reibung nutzen aus, dass durch die Funkübertragung eine störungsfreie direkte Beschleunigungsmessung möglich ist. Ein kabelgebundener Beschleunigungssensor würde die Bewegung beeinflussen.

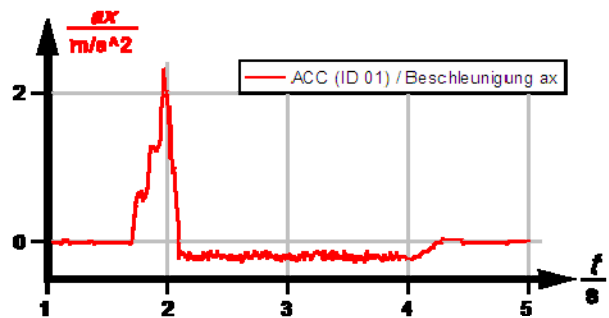


Abb. 3: Beschleunigung beim Anstoßen (nach 1,7 s) und Ausrollen (von  $t = 2,1$  s bis  $t = 4,2$  s) des Experimentierwagens aus Abbildung 2.

## 2.2 Ein Experiment zum dritten newtonschen Gesetz

Die Vorstellungen von Schülern zum Begriff „Kraft“ stehen teilweise im Widerspruch zu den physikalischen Vorstellungen, was insbesondere auch für die Aussage des dritten newtonschen Gesetzes gilt. Leider gibt es hierzu in Schulbüchern nur wenige unterschiedliche Experimente [1]. Ein bekannter Versuch zeigt zwei Schüler auf zwei Skateboards, wobei ein Schüler den anderen aktiv an einem Seil heranziehen soll, während der Zweite das Seil nur passiv festhält. Bei anderen Varianten dieses Versuches werden Fahrtische oder Bürostühle verwendet. Allerdings tritt bei der Durchführung dieser Versuche häufig das Problem auf, dass an beiden „Fahrzeugen“ unterschiedliche Reibungskräfte wirken, sodass sich keine gleichen Geschwindigkeitsbeträge einstellen und die Schüler sich nicht in der Mitte treffen. Außerdem wird nur die Ortsänderung deutlich, aber nicht die Beschleunigung und die damit verbundene Kraft. Aus diesem Grund wurde der Versuch auf einer Luftkissenfahrbahn nachgebaut (siehe Abb. 4), wodurch eine quantitative Behandlung zur Erarbeitung des dritten newtonschen Gesetzes möglich wird.

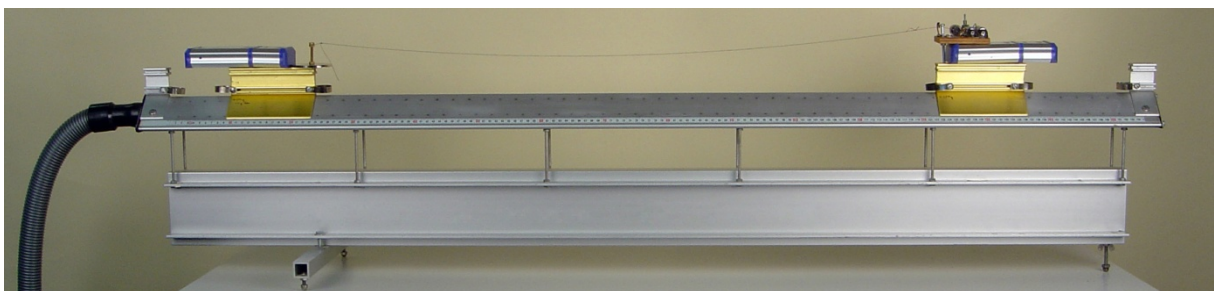


Abb. 4: „Skateboard-Versuch“ auf einer Luftkissenfahrbahn

Dazu wurden zwei Luftkissengleiter mit einem Beschleunigungssensor versehen. Auf einem der Gleiter befindet sich außerdem ein kleiner Gleichstrommotor, der einen Faden zwischen den beiden Fahrzeugen aufwickeln kann. Wird der Motor eingeschaltet, bewegen sich die

Gleiter aufeinander zu, bis sie miteinander stoßen. Danach fahren sie kurze Zeit wieder auseinander, werden dabei vom Motor abgebremst und bewegen sich schließlich wieder beschleunigt aufeinander zu. Durch die Beschleunigungsmessung kann man erkennen, dass sich die beiden Gleiter mit betragsmäßig gleichen Beschleunigungen aber entgegengesetztem Vorzeichen bewegen. Auf beide Gleiter wirken also Kräfte mit gleichem Betrag aber entgegengesetzter Richtung. In Abbildung 5 ist ein Ausschnitt der gemessenen Beschleunigungen dargestellt. Zwischen  $t = 6,5$  s und  $t = 8,2$  s bewegen sich die Gleiter nach einem Stoß auseinander und in der zweiten Phase zwischen  $t = 8,3$  s und  $t = 10,3$  s fahren sie wieder aufeinander zu. Die unterschiedlichen Beträge in der ersten und zweiten Phase lassen sich durch eine unterschiedliche Zugkraft des Motors je nach Drehrichtung und durch Reibungseffekte erklären.

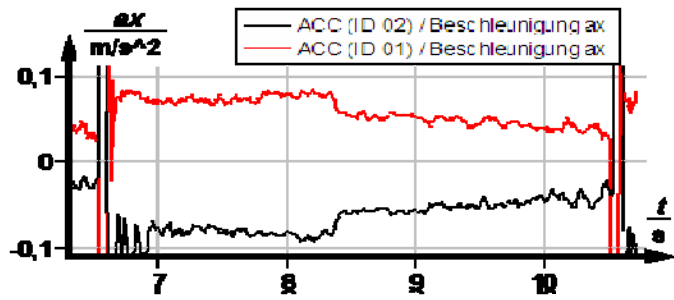


Abb. 5: Beschleunigungen der Luftkissengleiter zwischen zwei Stößen (bei  $t = 6,3$  s und  $t = 10,4$  s)

### 2.3 Fall mit Luftreibung

Bisher konnten Fallbewegungen mit Luftreibung nur schwer quantitativ ausgewertet werden. Durch die Funkübertragung lässt sich sehr einfach der Fall eines Beschleunigungssensors an einem Fallschirm beobachten. Bei Durchführungen mit verschiedenen Fallschirmmodellen hat sich gezeigt, dass für einen typischen Verlauf ein starrer Schirm und eine möglichst starre Verbindung zwischen Schirm und Sensor nötig sind. Wie in Abbildung 6 wurde darum ein Regenschirm als Fallschirm benutzt.



Abb. 6: Regenschirm als Fallschirm mit Cobra4-Sensor

Durch die geschwindigkeitsabhängige Luftreibungskraft nimmt der Beschleunigungsbetrag während des Falls ab, bis die Fallgeschwindigkeit nach circa 0,9 s konstant ist. Die gemessene Beschleunigung kann numerisch integriert werden, um so die Geschwindigkeit

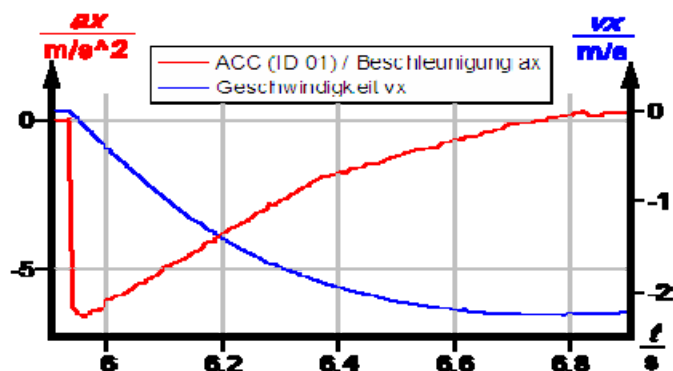


Abb. 7: Verlauf der gemessenen Beschleunigung (rot) und der berechneten Geschwindigkeit (blau)

keit des Beschleunigungssensors zu berechnen. Das Ergebnis ist in Abbildung 7 dargestellt. Zur weiteren Auswertung oder zur Vorbereitung des Versuches kann die Bewegung in einem Modellbildungsprogramm simuliert werden [2].

Aus dem gewonnen zeitlichen Verlauf der Beschleunigung und der Geschwindigkeit kann auch die Abhängigkeit der Luftreibungskraft von der Geschwindigkeit untersucht werden. Trägt man die Beschleunigung während des Fallens über dem Quadrat der Geschwindigkeit auf, ergibt sich über einen großen Geschwindigkeitsbereich eine sehr gute Übereinstimmung mit einer Geraden (siehe Abb. 8).

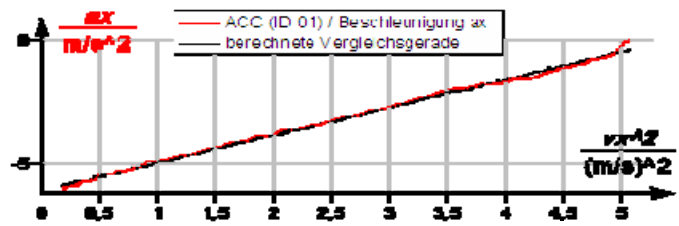


Abb. 8: Beschleunigung des Sensors in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsquadrates

## 2.4 Radialbeschleunigung bei Kreisbewegungen und Kurvenfahrten

An zweidimensionalen Bewegungen wird deutlich, dass Kraft, Beschleunigung und Geschwindigkeit vektorielle Größen sind. Es ist günstig, die Größen in ihren Komponenten tangential und radial zur Kreisbahn zu betrachten, denn der Beschleunigungsanteil in tangentialer Richtung sagt etwas über die Veränderung des Geschwindigkeitsbetrages aus. Der Beschleunigungsanteil in radialer Richtung ist dafür verantwortlich, dass sich der Körper nicht auf einer Geraden bewegt, sondern sich die Richtung der Geschwindigkeit ändert. Das heißt auch, dass der radiale Beschleunigungsanteil nur dann verschwindet, wenn sich der Körper geradlinig bewegt. Umgekehrt führt eine Radialbeschleunigung nicht zu einer Änderung des Geschwindigkeitsbetrages, sondern nur zu einer Änderung der Bewegungsrichtung.

Die Bewegung eines Körpers auf einer Kreisbahn ist ein wichtiger Spezialfall einer zweidimensionalen Bewegung. Da die Radialbeschleunigung bei Kreisbewegungen in Richtung des Kreismittelpunktes zeigt, wird sie auch Zentripetalbeschleunigung  $\vec{a}_z$  genannt. Sie hängt quadratisch vom Geschwindigkeitsbetrag ab, was durch Funksensoren sehr einfach experimentell nachgewiesen werden kann. Häufig wird im Physikunterricht die Beschleunigung auf die Änderungsrate des Geschwindigkeitsbetrages  $\vec{a} = \frac{\Delta|\vec{v}|}{\Delta t}$  reduziert, was bei einigen Bewegungsanalysen zu falschen Vorhersagen führt [3]. Mit dieser Vorstellung kann insbesondere die Zentripetalbeschleunigung bei gleichförmigen Kreisbewegungen ( $\dot{\omega} = 0$ ) nicht erklärt werden, da hier  $|\vec{v}|$  konstant ist. Experimente zur Beschleunigungsmessung bei Kreisbewegungen können ein Ansatz sein, diese Schülervorstellungen zu korrigieren.



Durch einen einfachen Aufbau wie in Abbildung 9 lassen sich Radial- und Tangentialbeschleunigung während einer Kreisbewegung messen. Die Achsen des Beschleunigungssensors zeigen dabei immer in radiale und tangential Richtung, wie Abbildung 10 verdeutlicht. Durch eine entsprechende Fixierung kann daher leicht die Zentripetalbeschleunigung erfasst werden. Wird der Sensor in Abbildung 9 kurz angestoßen, ergibt sich der Beschleunigungsverlauf aus Abbildung 11.



Abb. 9: Cobra4-Sensor drehbar gelagert



Abb. 10: Die x-Achse des Beschleunigungssensors zeigt immer in radiale Richtung

Ursache der tangentialen Beschleunigung ist die Reibung im Kugellager, daher ist die Tangentialbeschleunigung nahezu konstant. Sie bremst den Sensor ab und mit dem Tempo nimmt auch der Betrag der Radialbeschleunigung ab. Um die Abhängigkeit der Beschleunigung in radialer Richtung von der Geschwindigkeit zu untersuchen, muss auch die Winkelgeschwindigkeit des Sensors gemessen werden. Um die Geschwindigkeit variieren zu können, wird der Beschleunigungssensor auf einem Experimentiermotor

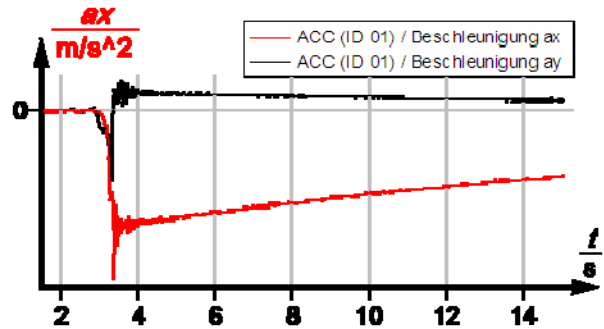


Abb. 11: Radialbeschleunigung (rot) und Tangentialbeschleunigung (schwarz) während einer langsamer werdenden Kreisbewegung

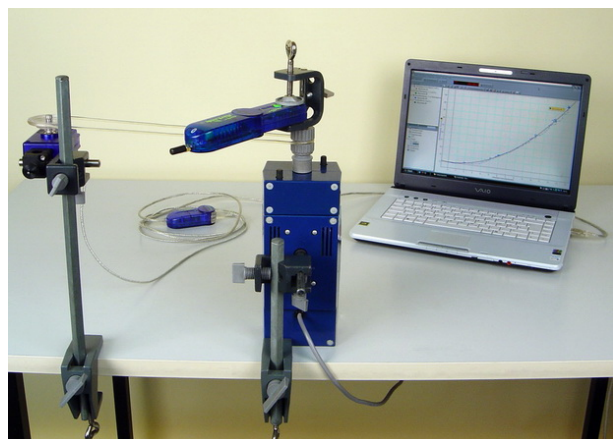


Abb. 12: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Abhängigkeit der Radialbeschleunigung von der Geschwindigkeit mit Passport-Sensoren

befestigt und die Winkelgeschwindigkeit über einen Drehratesensor gemessen (siehe Abb. 12). Durch die computergestützte Erfassung beider Größen kann direkt die Radialbeschleunigung als Funktion der Winkelgeschwindigkeit gezeichnet werden. Ein Vergleich mit einer angepassten Parabel bestätigt gut den quadratischen Zusammenhang (siehe Abb. 13). Ebenso kann eine neue Größe  $v^2$  berechnet und die Zentripetalbeschleunigung in Abhängigkeit von  $v^2$  gezeichnet werden. Die Beschleunigungsmessung in radialer und tangentialer Richtung erlaubt auch eine einfache Bewegungsanalyse eines ferngesteuerten Modellautos wie in Abbildung 14. Durch entsprechende Versuche kann erkannt werden, dass Anfahren bzw. Abbremsen mit Beschleunigungen in bzw. gegen die Fahrtrichtung verbunden sind und das



Abb. 14: Modellauto mit Beschleunigungssensor

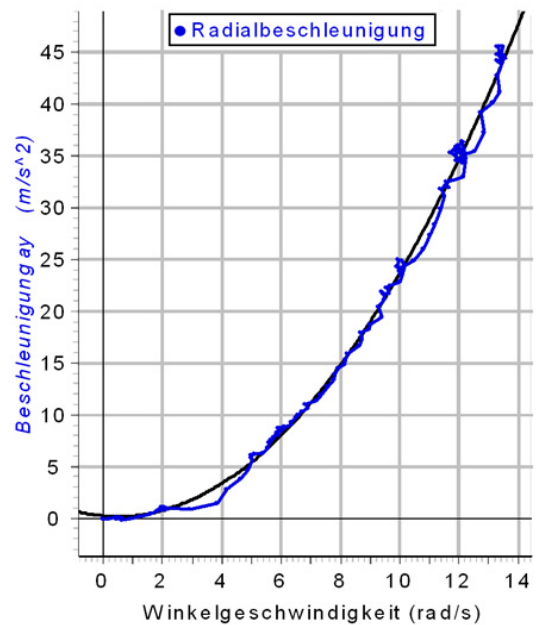


Abb. 13: Radialbeschleunigung als Funktion der Winkelgeschwindigkeit (blau) mit Vergleichsparabel (schwarz)

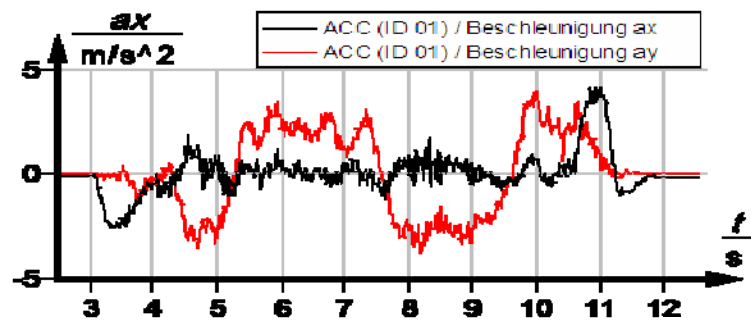


Abb. 15: Tangentialbeschleunigung (schwarz) und Radialbeschleunigung (rot) des Modellautos für vier Kurven in abwechselnder Richtung.

eine Kurvenfahrt mit einer Beschleunigung in radialer Richtung verbunden ist. Dadurch können auch die bisherigen Untersuchungen von Kreisbewegungen motiviert werden. Abbildung 15 zeigt die Beschleunigungen des Autos bei einer Kurvenfahrt, wobei das Auto abwechselnd nach rechts und links gelenkt wurde.

Nach dem das Tempo zwischen  $t = 3$  s und  $t = 4$  s erhöht wurde, verschwindet die Tangentialbeschleunigung bis auf kleinere Störungen beim Richtungswechsel. Man erkennt zwischen  $t = 4$  s und  $t = 11$  s vier Plateaus der Radialbeschleunigung, die den vier gefahrenen Kurven entsprechen. Die unterschiedlichen Richtungen (Krümmungen) der Kurven spiegeln sich in den abwechselnden Vorzeichen der Radialbeschleunigung wieder.

## 2.5 Harmonische und anharmonische Schwingungen eines Stabpendels

Durch den Beschleunigungssensor ist es möglich, Bewegungen eines Pendels sehr einfach zu erfassen. Dadurch können sowohl harmonische als auch anharmonische Schwingungen sehr leicht experimentell aufgenommen und diskutiert werden. Da die harmonische Schwingung nur eine Idealisierung realer Vorgänge darstellt, sollten auch die Grenzen dieses Modells deutlich gemacht werden. Zu diesem Zweck gibt es bereits Vorschläge, auch anharmonische Schwingungen im Unterricht zu behandeln [4].

Abbildung 17 zeigt den Verlauf der Tangentialbeschleunigung des Pendels für drei verschiedene Auslenkungen. Die Beschleunigung weicht zunehmend von einem sinusförmigen Verlauf ab und die Periodendauer wird mit steigender Auslenkung größer. Da geschlossene mathematische Lösungen fehlen, ist dieser Versuch eine gute Gelegenheit für einen Vergleich zwischen Experiment und einer Modellierung mit einem geeigneten Modellbildungsprogramm.

Ebenso ist es möglich, die Radialbeschleunigung während der Pendelbewegung zu betrachten. Zum einen besteht die radiale Beschleunigung wie auch die Tangentialbeschleunigung aus einem winkelabhängigen Anteil der Erdbeschleunigung. Zum anderen wirkt auf den Sensor aufgrund der Bewegung auf einer Kreisbahn eine geschwindigkeitsabhängige Zentripetalbeschleunigung. Eine entsprechende Modellierung der Radialbeschleunigung findet sich bei [2]. Für kleine Auslenkwinkel ist der Verlauf der Radialbeschleunigung ebenfalls harmonisch, die Periodendauer beträgt aber nur die Hälfte der Schwingungsdauer der Tangentialbeschleunigung (siehe Abb. 18).

Für große Auslenkwinkel weicht auch der Verlauf der Radialbeschleunigung stark von einer harmonischen Schwingung ab. Ein Vergleich



Abb. 16: Beschleunigungssensor als Stabpendel

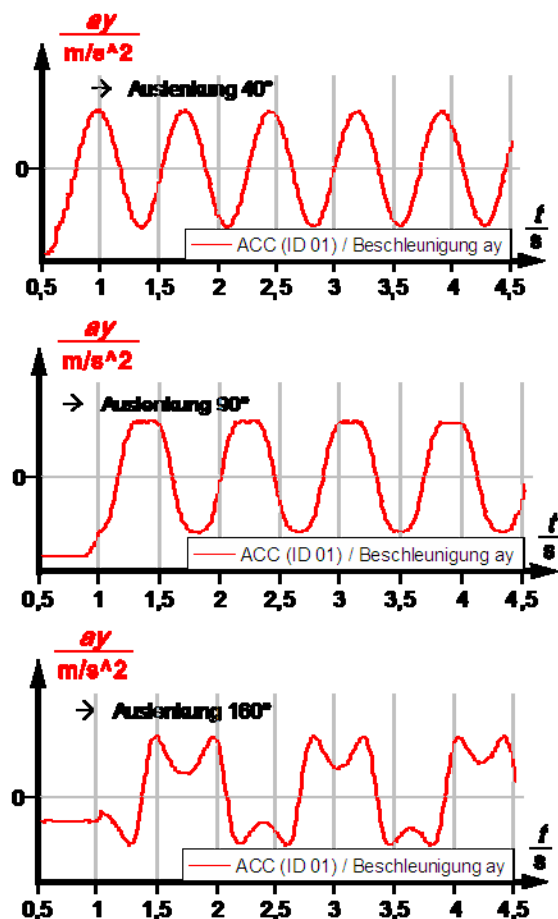


Abb. 17: Tangentialbeschleunigung des Pendels für drei verschiedene Auslenkungen

Abb. 17: Tangentialbeschleunigung des Pendels für drei verschiedene Auslenkungen



der gemessenen Beschleunigung bei einem Auslenkwinkel von  $180^\circ$  und einer entsprechenden Modellierung der Radialbeschleunigung ist in Abbildung 19 dargestellt.

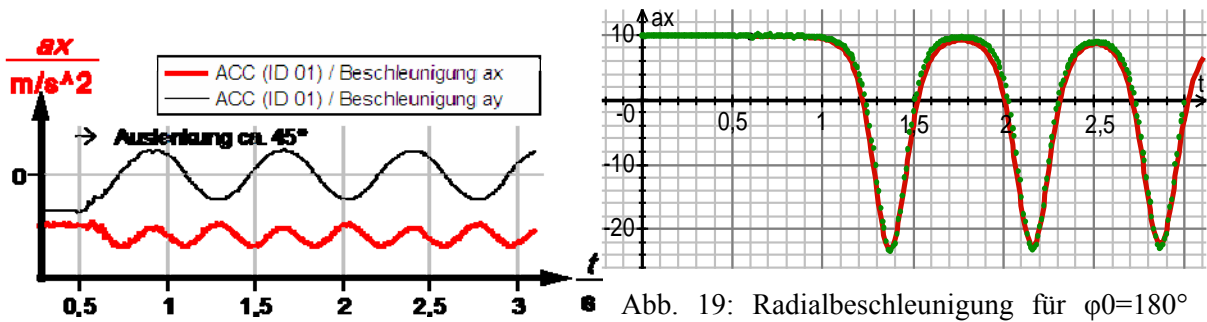


Abb. 18: Radialbeschleunigung des Pendels (rot) und tangentielle Beschleunigung (schwarz) zum Vergleich

Abb. 19: Radialbeschleunigung für  $\varphi_0=180^\circ$  gemessen (grün) und modelliert (rot)

## 2.6 Bewegungen aus dem Alltag – Gehen, Laufen, Fahrradfahren

Mikelskis-Seifert benutzte einen Beschleunigungssensor zur Untersuchung von Bewegungsvorgängen, die auf den menschlichen Körper bezogen sind, und erwartet von der Verwendung von Beschleunigungssensoren einen Beitrag zur Attraktivitätssteigerung des Mechanikunterrichts [5]. Durch die direkte Beschleunigungsmessung können auch Bewegungen aus dem alltäglichen Leben wie Gehen, Springen und Fahrradfahren analysiert werden. Durch die Möglichkeiten der Funkübertragung lassen sich Alltagsbewegungen noch einfacher im Unterricht untersuchen, da kein Kabel die Bewegung stört, welches auch ein Unfallrisiko darstellen oder den Bewegungsradius einschränken würde.



Abb. 20: Beschleunigungsmessung am Unterschenkel

Bereits eine so selbstverständliche Bewegung wie das Gehen und die damit verbundenen Bewegungsabläufe sind sehr komplex. Zunächst muss klar sein, welche Einzelbewegung untersucht werden soll, da der Körperschwerpunkt eine andere Beschleunigung erfährt als beispielsweise der Fußbereich (siehe Abb. 20). Abbildung 21 zeigt den Verlauf der Beschleunigung während zweier Schritte in Richtung senkrecht zur Bewegungsrichtung nach oben für die Sensorposition aus Abbildung 20.

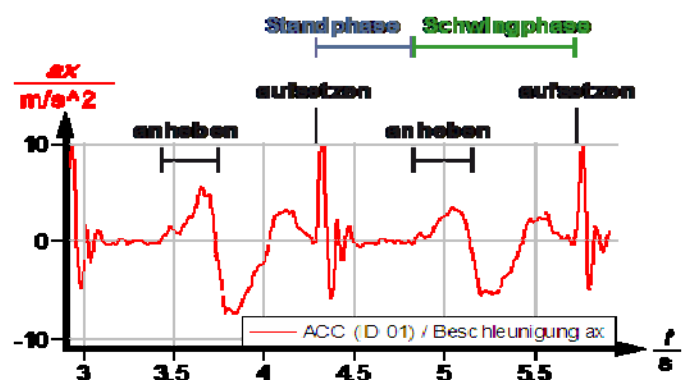


Abb. 21: Ausschnitt der periodischen Beschleunigung beim Gehen in Richtung senkrecht zur Bewegungsrichtung nach oben

Der charakteristische Verlauf für einen Schritt kann in eine „Standphase“ und eine „Schwingphase“ eingeteilt werden. Die Standphase beginnt mit dem Aufsetzen und dauert bis zum Abheben des Fußes. Entsprechend beginnt die Schwingphase, wenn der Fuß abhebt und endet, wenn er wieder aufsetzt. Aus der Dauer der Standphase und dem Amplitudenverlauf während der Schwingphase lassen sich Rückschlüsse auf die Schrittlänge und Geschwindigkeit gewinnen. Diese Methode wird in modernen „Schrittzählern“ benutzt, um die Momentangeschwindigkeit und die zurückgelegte Entfernung beim Joggen oder Walken zu berechnen.

Während beim Gehen immer ein Fuß Kontakt mit dem Untergrund hat, befinden sich beim Laufen beide Füße über eine bestimmte Zeitspanne in der Luft. Diese Tatsache kann durch eine Beschleunigungsmessung näher untersucht werden. Für einen entsprechenden Versuch wird der Sensor in der Nähe des Schwerpunktes zum Beispiel an einem Gürtel befestigt. Abbildung 22 zeigt einen zugehörigen Beschleunigungsverlauf.

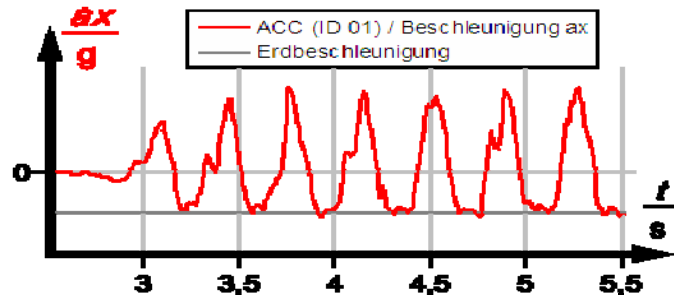


Abb. 22: Beschleunigung beim Laufen senkrecht zur Bewegungsrichtung nach oben

Zu Beginn zwischen  $t = 2,7$  s und  $t = 2,9$  s ist die Beschleunigung kurz negativ, was durch das leichte Anwinkeln der Knie vor dem ersten Schritt erklärt werden kann. Danach wird der Schwerpunkt nach oben beschleunigt. Nach jedem Abstoßen mit positiver Beschleunigung sinkt die Beschleunigung auf etwa  $-1$  g, der Körper befindet sich also im freien Fall, bis der nächste Fuß aufsetzt und den Körper wieder abstößt.

Eine weitere Alltagssituation, die im Physikunterricht analysiert werden kann, ist das Fahrradfahren. Einerseits können also durch Beschleunigungsmessungen Bewegungsabläufe des menschlichen Körpers wie beim Gehen und Laufen untersucht werden. Andererseits können mechanische Gesetzmäßigkeiten zum Beispiel durch Anfahr- und Abbremsvorgänge mit einem Fahrrad oder einem Modellauto untersucht werden.

## 2.7 Einflussgrößen der Zentripetalkraft

Neben Beschleunigungsmessungen können die Vorteile der Funkübertragung auch bei Messungen zur Zentripetalkraft ausgenutzt werden. Einen

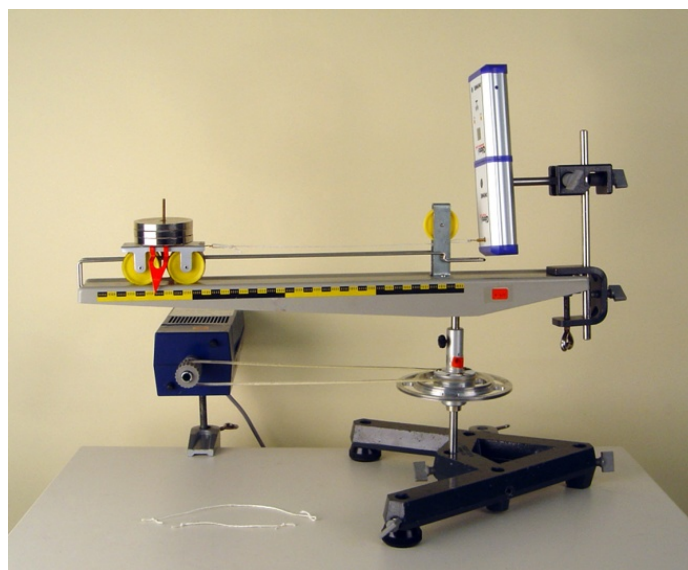


Abb. 23: Versuchsaufbau zur Zentripetalkraft mit dem Cobra4-Kraftsensor

möglichen Versuchsaufbau, um die Einflussgrößen der Zentripetalkraft zu untersuchen, zeigt Abbildung 23. Um auch die Abhängigkeiten von Masse und Radius zu untersuchen, kann der Betrag der Geschwindigkeit mit einem Experimentiermotor konstant gehalten werden. Um die quadratische Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wie in Abschnitt 2.4 zu zeigen, muss zusätzlich die Winkelgeschwindigkeit gemessen werden. Durch die Funkübertragung vereinfacht sich der Versuchsaufbau, da sich kein Kabel oder Faden verdrillen kann.

## 2.8 Parallelexperimente mit mehreren Funksensoren an einem Rechner

Einige Experimente werden im Physikunterricht mehrmals durchgeführt, um den Einfluss einzelner Parameter zu untersuchen oder zu verdeutlichen. Werden diese Experimente gleichzeitig durchgeführt, spricht man von Parallelexperimenten. Nach Wilke besitzen diese eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem üblichen „Nacheinander“ [6]. So reduziert sich die Experimentierzeit auf einen Bruchteil und die Messergebnisse müssen nicht nach jedem Teilergebnis festgehalten werden. Die Schüler werden aktiviert, da mehr Schüler in den Aufbau und die Durchführung einbezogen werden können. Außerdem werden die Möglichkeiten des Vergleichs zwischen Ergebnissen oder Vorgängen stark verbessert. Die Nachteile solcher Parallelexperimente sind ein größerer Vor- und Nachbereitungsaufwand als bei einem Einzelexperiment und ein größerer Gerätebedarf.

In der *Cobra4*-Reihe von *Phywe* können bis zu 99 Sensoren gleichzeitig an einem Computer angeschlossen werden. Auf diese Weise sind Parallelexperimente möglich, die an einem einzigen Computer ausgewertet werden. So können zum Beispiel die Messwerte von verschiedenen Schülergruppen an den Lehrer-PC übertragen und dort gemeinsam ausgewertet werden. Be-

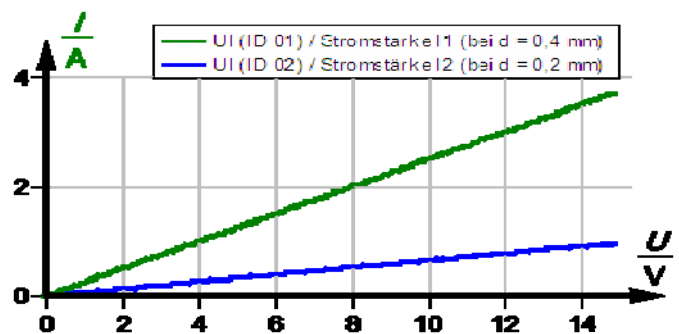


Abb. 24: Kennlinien von zwei Konstantandrähten mit unterschiedlichen Durchmessern

sonders geeignet für computergestützte Parallelexperimente sind Versuche, bei denen der zu untersuchende Zusammenhang nicht von der Zeit abhängt. Die Experimente können dann in den einzelnen Gruppen zeitlich versetzt oder unterschiedlich schnell durchgeführt werden. Beispiele für solche Experimente sind Strom- und Spannungsmessungen an verschiedenen Bauteilen. So können die Kennlinien unterschiedlicher Metalle, eines Metalls in Luft und Wasser oder von baugleichen Dioden bei verschiedenen Temperaturen aufgenommen werden. In Abbildung 24 sind exemplarisch die Kennlinien von zwei verschiedenen Konstantandrähten mit unterschiedlichem Durchmesser dargestellt. So kann die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands eines Drahtes von den geometrischen Parametern Länge und Querschnittsfläche untersucht werden. Außerdem können die spezifischen Widerstände unterschiedlicher Metalle verglichen werden.

### 3. Fazit

Die Funkübertragung bietet einige Vorteile gegenüber herkömmlichen kabelgebundenen Messungen mit einem mitgeführten Sensor, aber auch bezüglich Versuchen mit feststehenden Sensoren außerhalb. Die Vorzüge werden bei Bewegungsanalysen mit einem Beschleunigungssensor besonders deutlich. Durch die direkte und berührungsfreie Beschleunigungsmessung von Bewegungen ergeben sich neue Möglichkeiten für den Physikunterricht. Neben neuen Möglichkeiten vereinfachen sich viele Experimente aus der Mechanik. Insgesamt wird deutlich, dass Funksensoren die Experimentiermöglichkeiten im Physikunterricht erweitern können und es von Vorteil ist, wenn ein Messwerterfassungssystem u.a. auch diese Möglichkeit bietet.

Interessant dürfte sich auch die weitere Entwicklung von Handys und MP3-Playern mit eingebautem Beschleunigungssensor gestalten. Bei einigen Modellen ist es bereits möglich, die Beschleunigungswerte auszulesen, darzustellen und drahtlos an einen Computer zu übertragen.

#### Literatur

- [1] *T. Wilhelm, D. Heuer*: Experimente zum dritten Newton'schen Gesetz zur Veränderung von Schülervorstellungen. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik, Heft 3/53, 2004, S. 17–22
- [2] *S. Scheler*: Neue Möglichkeiten mit Funksensoren. Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/funksensoren.pdf>, 2009
- [3] *T. Wilhelm*: Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung. Logos-Verlag, Berlin, 2005
- [4] *D. Heuer*: Anharmonische Schwingungen - qualitatives Argumentieren, angeregt durch Experimentieren und Modellieren. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik, Heft 7/42, 1993, S. 6–16
- [5] *S. Mikelskis-Seifert, F. Roesler*: Beschleunigungssensoren im Mechanikunterricht. In: V. Nordmeier, H. Grötzebauch (Hrsg.): Didaktik der Physik - Kassel 2006. Lehmanns Media, Berlin
- [6] *H.-J. Wilke*: Parallelexperimente. In: Naturwissenschaften im Unterricht - Physik, Nr. 18, 1993, S. 21–27

#### Anschrift der Verfasser:

*Stefan Scheler*, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, [stefan.scheler@web.de](mailto:stefan.scheler@web.de)  
 AR Dr. *Thomas Wilhelm*, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, [wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de), [www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm](http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm)

#### Kurzfassung

Mit den modularen Systemen *Cobra4* von *Phywe* und *Pasport* von *Pasco* können verschiedene Funksensoren im Unterricht eingesetzt werden, um Messdaten vom Sensor zum Computer per Funk zu übertragen. Es werden neue Möglichkeiten und Vorteile dieser Funksensoren anhand verschiedener Experimente untersucht. Hierzu zählen Versuche, die kabelgebunden nur schwierig durchzuführen sind, aber auch neue Experimente, die erst durch kabellose Sensoren ermöglicht werden. Dargestellt werden u.a. die Gleit- und Rollreibung, das dritte newtonsche Axiom, der Fall mit Luftreibung, die Radialbeschleunigung, Schwingungen eines Stabpendels und Alltagsbewegungen.