

## ■ Im Dreieck springen und werfen

Bei den Leichtathletik-Europameisterschaften in Berlin unterstützt modernste Lasertechnik die Kampfrichter bei der Weitenmessung.

Anfang August finden nach 16 Jahren die Leichtathletik-Europameisterschaften wieder in Deutschland statt. In Berlin sind dann in einigen Disziplinen enge Entscheidungen zu erwarten. Beim Speerwerfen der Männer trennen die drei deutschen Athleten an der Spitze der aktuellen Weltjahresbestenliste nur wenige Zentimeter – obwohl sie ihr Arbeitsgerät fast hundert Meter weit werfen. Das stellt die Technik hinter der Weitenmessung vor große Herausforderungen.

Grundlage der Weitenmessung ist seit Jahren die Triangulation (Abb. 1). Die Wurfweite  $W$  berechnet sich über den Cosinussatz in einem Dreieck, in dem die beiden anderen Schenkel  $P$  und  $D$  sowie der davon eingeschlossene Winkel  $\alpha$  bekannt sind. Die Strecke  $P$  als Abstand zwischen dem Tachymeter und einem vorgegebenen Punkt  $M$  wird schon vor dem Wettkampf bestimmt – die Anlage wird „eingemessen“. Nach dem Wurf markiert ein Kampfrichter die vordere Kante des Abdrucks



Im Olympiastadion in Berlin tragen die Leichtathleten vom 7. bis 12. August die diesjährigen Europameisterschaften aus.

des Speers im Rasen. Ein zweiter Kampfrichter peilt mit einem Tachymeter die Markierung an. Das Gerät bestimmt die Entfernung  $D$  zum Einschlagpunkt sowie den Winkel zwischen Einschlagpunkt und Abwurfstelle  $\alpha$ .

Was sich einfach anhört, ist im Detail eine Messaufgabe, die mit technischen und physikalischen Herausforderungen aufwartet. Zum Beispiel schickt das Tachymeter einen infraroten Laserstrahl zur Markierung. Aus der Laufzeit des Echos ergibt sich die Entfernung. Dazu darf der Laser aber nicht kontinuierlich strahlen, sondern muss kurze Pulse von ein bis zehn Nanosekunden Dauer aussenden. Damit ist es eindeutig möglich, dem gemessenen Echo einen Puls zuzuordnen. Das Tachymeter enthält dazu eine hochgenaue Zeitbasis mit einem Schwingquarz.

Weil die Laufzeit des Signals nur wenige Nanosekunden beträgt, muss die Elektronik sehr stabil arbeiten. Schon kleine Änderungen der Temperatur führen aber zu einer Drift in der Elektronik und verursachen damit Messfehler. Um dies zu verhindern, enthält das Gerät einen halbdurchlässigen Spiegel, der das Licht in zwei Strahlen aufspaltet: den Signalstrahl für die eigentliche Messung und den Referenzstrahl. Der Referenzstrahl läuft

im Gerät über eine definierte Strecke und ist mit dem Signalstrahl synchronisiert. Abweichungen in der Elektronik betreffen demnach beide Strahlen und lassen sich eliminieren, weil es sich damit um eine relative Messung handelt.

Diese Methode stützt sich allein auf die Laufzeit der Pulse und ist nicht exakt genug für Zentimeterentscheidungen. Daher kommt zusätzlich eine Modulation der Amplitude, also der Helligkeit des Laserstrahls, zum Einsatz. Beide Methoden verwenden dieselbe Hardware aus Laser und Optik. Mit einer Frequenz von bis zu 100 MHz variiert die Helligkeit des Lasers, basierend auf einer hochpräzisen Quarzuhr. Durch die unterschiedliche Wegstrecke, die Signal- und Referenzstrahl durchlaufen, kommt es zu einer Phasenverschiebung. Daraus lässt sich die Dauer zwischen Aussenden und Empfangen des reflektierten Signals bestimmen und wiederum die zurückgelegte Strecke berechnen.

Allerdings ist das Ergebnis nicht eindeutig, sondern lässt nur auf einen Phasenunterschied von  $\varphi + n \cdot 360^\circ$  schließen. So kann die Elektronik beispielsweise Werte von  $90^\circ$  und  $450^\circ$  nicht trennen – für die gemessene Weite kann dies aber mehrere Meter Unterschied bedeuten. Daher kommen immer beide

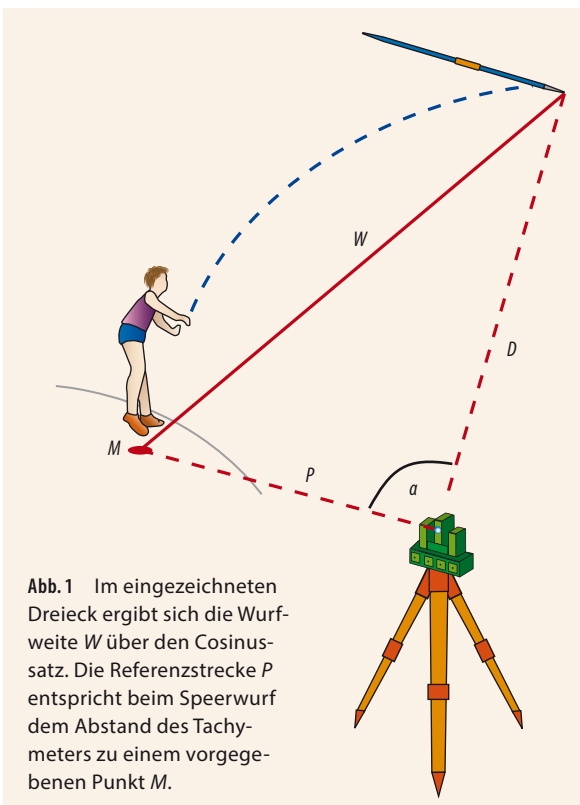


Abb. 1 Im eingezeichneten Dreieck ergibt sich die Wurfweite  $W$  über den Cosinussatz. Die Referenzstrecke  $P$  entspricht beim Speerwurf dem Abstand des Tachymeters zu einem vorgegebenen Punkt  $M$ .

Analysen zum Einsatz: Aus der Puls-Laufzeit-Methode ergibt sich die Entfernung grob mit einigen zehn Zentimetern Genauigkeit, die Modulations-Phasen-Methode reduziert den Fehler auf Millimeter.

Als Unsicherheiten bleiben dann vor allem das Einmessen der Anlage, also wie präzise die Strecke  $P$  im Triangulationsdreieck bekannt ist, und die exakte Position und Ausrichtung der Markierung am Auftreffpunkt des Speers. Lässt sich dieser nicht bestimmen, beispielsweise weil der Speer nicht im Rasen steckt, sondern nur darüber gerutscht ist, wird der Versuch als ungültig gewertet. Mit dieser Methode lassen sich auch sehr schnell Geschwindigkeiten bestimmen, weil sich aus zwei Messungen in kurzem zeitlichen Abstand die zurückgelegte Strecke ergibt. So ist es möglich, das Anlauftempo eines Weitspringers zu ermitteln oder die Beschleunigung von Sprintern aus dem Startblock.

Wirkliche Alternativen zur Lasertriangulation gibt es bisher nicht. Beispielsweise scheidet Ultraschall aufgrund der niedrigen Frequenzen und der damit verbundenen hohen Messungenauigkeit aus. In jüngster Zeit kommen vermehrt Kamerasysteme zum Einsatz. Montiert auf Stadionsdach oder Tribüne haben mehrere Kameras die gesamte Anlage im Blick, um die Verzerrung des Bildes durch

schräge Blickwinkel zu reduzieren. Wichtig ist es, die Kameras störungsfrei zu fixieren und anhand vorgegebener Distanzen die Anlage vor dem Wettkampf exakt einzumessen. Das ist insbesondere bei kurzen Distanzen gut möglich, wie sie beim Weitsprung oder Dreisprung auftreten (Abb. 2). Auch die Fläche ist hier mit der Sprunggrube gut überschaubar, sodass schon zwei Kameras millimetergenaue Weiten ergeben.

#### Auf den Meter kommt es an...

Auch außerhalb des Stadions kommt es auf eine genaue Längenmessung an, beispielsweise beim Marathon. Denn die farbige Linie auf der Straße, die den Sportlerinnen und Sportlern den Weg weist, muss bei einem offiziellen Marathon nach internationalen Wettkampfnormen exakt 42,195 Kilometer lang sein. Dazu wird die Strecke mit einem Jones-Counter ausgemessen, der ähnlich funktioniert wie der Kilometerzähler am Fahrradachometer.

Die Messvorrichtung ist nach ihrem Erfinder Alan Jones benannt, der das komplizierte Räder- und Zählwerk 1971 entwickelt hat. Bei den Olympischen Spielen in Montreal 1976 kam der Jones-Counter erstmals zum Einsatz. Montiert an der Vorderachse eines Fahrrads werden die Umdrehungen des Rades gezählt. Bruchteile davon

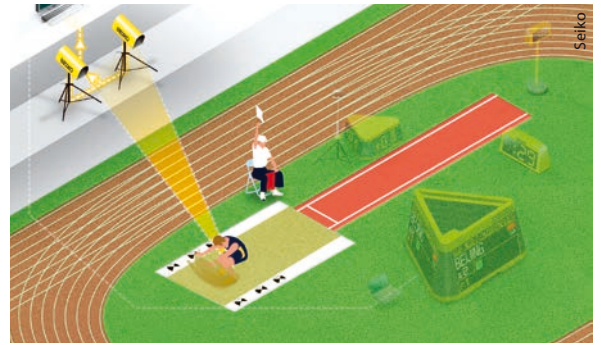


Abb. 2 Beim Weitsprung bestimmen zwei Kameras das Ergebnis.

ergeben sich, weil das Zählwerk pro Umdrehung um 20 oder 24 Einheiten vorrückt. Zusammen mit dem Umfang leitet sich daraus die Entfernung ab. Weil schon kleine Änderungen des Luftdrucks im Reifen erhebliche Auswirkungen auf dessen Umfang und damit die Längenmessung haben, ist es wichtig, den Jones-Counter regelmäßig auf einer Referenzstrecke zu kalibrieren, also die Länge zu bestimmen, die einer Radumdrehung entspricht. Die Referenzstrecke sollte zwischen 300 und 1000 Metern lang und mit einer unabhängigen Methode vermessen sein. Außerdem lässt sich die Unsicherheit durch mehrere Messungen reduzieren.

Wenn im August in Berlin die Speere durch das Olympiastadion fliegen und die schnellsten europäischen Läufer die Straßen der Hauptstadt unsicher machen, sorgt also präzise Messtechnik dafür, dass tatsächlich die Besten gewinnen.<sup>#)</sup>

**Bernd Müller**

#) Ich danke Dr. Ralf Lucklum von der Universität Magdeburg für seine Unterstützung.