

anemoi:

Benjamin Bachmaier hat während der unfreiwilligen Corona-Auszeit sein Wohnzimmer in ein Software-, Simulations- und Elektroniklabor verwandelt und eine hochpräzise Sensoreinheit zur Windberechnung für Segelflugzeuge entwickelt. Sie übersetzt die Bewegungsdaten des Flugzeugs in ein kinematisches Modell und berechnet unter anderem Ground Speed, True Airspeed, Kurs und Höhe. anemoi vergleicht diese mit GPS-Daten, Stau- und Statik-Druck-Messungen. Die Abweichung zwischen Modell und Messung ergibt ein präzises Bild von Geschwindigkeit und Lage des Flugzeugs und damit von der Richtung und Stärke des Windes.



TEXT UND INTERVIEW ERNST WILLI
BILDER: BENJAMIN BACHMAIER

die Live-Windanzeige



Und was haben Sie als Pilot nun für einen Nutzen daraus? Ganz einfach: Sie wissen jederzeit, woher und wie stark rund um ihr

Cockpit der Wind weht.

anemoi ist ein Stand-Alone-System für Piloten, die im Cockpit bereits ein Vario und ein Navigationssystem verbaut haben und ihre Instrumente mit einer Live-Windanzeige nachrüsten wollen. Das System besteht aus einer Sensorbox und einem externen Display. Die Anzeige stellt Veränderungen der Windrichtung und -Geschwindigkeit sofort dar und zeigt den Pilot/innen als zusätzliche Referenz auch den Durchschnitts-Wind.

Positive Piloten-Rückmeldungen

Eine erste Tranche von 100 produzierten Geräten war dieses Frühjahr nach kurzer Zeit verkauft und ist inzwischen in die Cockpits verbaut. [segelfliegen](#) hat sich bei einzelnen anemoi-Besitzern umgehört, um ein erstes Feedback über den Nutzen von anemoi zu erhalten. Die Rückmeldungen sind ausschließlich positiv. David Richter-Trummer z. B. bestätigte, dass er in seinem Flugzeug, in dem er eigentlich jede geringe Windbewegung spüre, „nur ganz selten ein anderes Empfinden als durch die Anzeige“ hatte. Er erwähnt außerdem, dass der grundlegende Algorithmus und eine berausend schnelle und präzise Wind-Anzeige den „Maßstab des heute technischen Möglichen“ darstelle.

Einer der anemoi-Anwender brachte den Einwand, dass die Windanzeige bezogen zum Steuerkurs und nicht „nach Norden ausgerichtet“ dargestellt werde, was für ihn das Gesamtbild der Windinformation erst mit „Kopfrechnen“ ermögliche.

Ein Pilot erwähnte bei der Umfrage, dass es nützlich wäre, die Windinformation in sein bestehendes XCsoar-System integrieren und darstellen zu können.

Lobend erwähnt wurde, dass anemoi vor allem bei schwachem Wind, den man sonst kaum spüre, einen Unterschied ausmache.

anemoi scheint damit der Start als unabhängige Alternative zum fix ins LX-Moving-Map und Variometer-System verbaute HAWK-Windmess-System von Prof Heinrich Meyr und Peng Huang (ausführlicher Bericht im [segelfliegen magazin](#) 02-2022, Link am Text-Ende) gut gelungen zu sein.

Wir haben Benjamin Bachmaier als treibende Kraft hinter dem anemoi-Projekt befragt und Antworten zu Entstehung und Ziel des Projektes erhalten:

Benjamin, was war deine Motivation für den „Windanzeiger in Echtzeit“?

Da ich überwiegend im Gebirge fliege, habe ich ständig mit wechselnden und oft überraschenden Windverhältnissen im Gelände zu tun. Vor einigen Jahren war das AirGlide-Variometer („Butterfly-Vario“) das erste Instrument, das in der Lage war, verlässliche Winddaten in Echtzeit zu berechnen. Als es auf den Markt kam, habe ich es schnell in meine LS1-f eingebaut und habe seitdem mehr als tausend Stunden mit dem Gerät geflogen.

Es war von Anfang an eine riesige Offenbarung. Die Windanzeige hat mich gelehrt, die Luftströmungen, in denen ich fliege, mit vollkommen neuen Augen zu sehen. Ich weiß nicht, ob ich noch ohne so ein Instrument fliegen wollen würde.

Als das AirGlide nach wenigen Jahren leider eingestellt wurde und kaum noch verfügbar ist, befürchtete ich, dass ein möglicher „Game Changer“, der wirklich einen positiven Beitrag zum Segelflug leisten kann, verloren geht, noch bevor er sich durchsetzt. Da ich beruflich eng mit Mathematik, Messtechnik und Zustands-Schätzung verbunden bin, habe ich zu Beginn des Corona-Lockdowns 2020 beschlossen,

diese Chance nicht ungenutzt vorbeiziehen zu lassen.

Was war/ist das Ziel des anemoi-Projektes?

Für mich war von Anfang an klar, dass ich kein Variometer entwickeln möchte – erstens, weil es mich persönlich wenig interessiert, ein Problem zu lösen, für das es schon andere Lösungen auf dem Markt gibt, und zweitens, weil ja jeder mindestens ein Vario im Cockpit hat. Die Windanzeige „anemoi“ sollte für jedes Cockpit nachrüstbar sein, ohne dazu auf ein neues Vario- oder Navigationssystem umsteigen zu müssen.

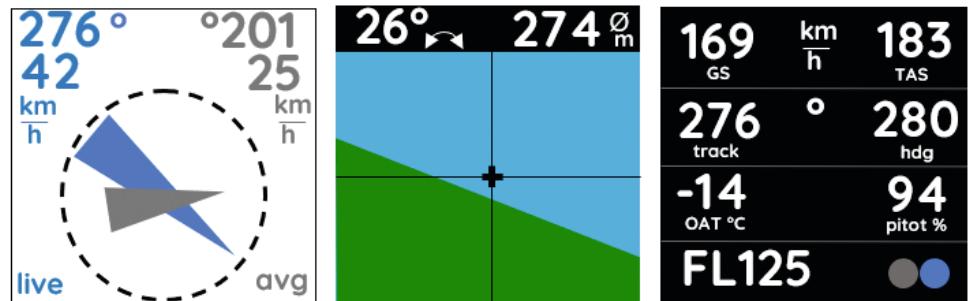
Ein einfacher Einbau bedeutet auch, dass der Einbauort der Sensoreinheit egal sein sollte. Das AirGlide arbeitete mit einem Magnetfeldsensor, um die Inertial-Daten um die Heading-Achse zu stützen (*Inertial-Daten = räumliche Kombination mehrerer Inertial-Sensoren wie Beschleunigungssensoren und Drehratenensoren, stellt die sensorische Messeinheit eines Trägheitsnavigationsystems dar. Anwendungen liegen u. a. bei Flugzeugen und Raketen zur Flugnavigation*).

Ich muss ganz offen sagen, dass das in vielen Cockpits nicht so gut funktioniert hat, da Metallteile, Stromkabel und andere Störeinflüsse eine einwandfreie Heading-Messung unmöglich machen, was die Windanzeige stark verfälschen kann. Daher habe ich mich entschieden, mit aufwändigen mathematischen Mitteln die Sensorfusion so weit zu verfeinern, dass eine Magnet-Messung nicht mehr notwendig ist.

Die Entwickler des HAWK-Projektes (Prof Meyr und Peng Huang), welches etwa parallel zu meinem Projekt entstanden ist, sind aus dem gleichen Grund einen ähnlichen Weg gegangen und haben neben der praktischen Erprobung in wissenschaftlichen Veröffentlichungen sogar den theoretischen Beweis über die Validität dieses Ansatzes erbracht.

Die drei Displayseiten (rechts) des anemoi zeigen den Wind, den Horizont, und einige wichtige Flugparameter als Zahlenwerte an

Über den Wolken (Mitte) ist anemoi in seinem Element und in ungewollt brenzligen Wolkensituationen (unten) kann der künstliche Horizont von anemoi (rechts im Bild, hier im Vergleich mit AirGlide in der Mitte) lebensrettend sein



Wie hast du die Projekt-Idee realisiert?

Da ich in der Corona-Zeit unfreiwillig viel Zeit zuhause verbracht habe, wollte ich die Zeit nutzen, um ein richtig komplexes Elektronikprojekt von vorne bis hinten selbst umzusetzen. So wurde unser Wohnzimmer zu einem Software-, Simulations- und Elektroniklabor. Der Algorithmus war im Spätsommer 2020 fertig in Flugsimulationen entwickelt und getestet.

Im Winter 2021 habe ich die Hardware der Prototypen-Sensorbox gebaut und damit Anfang der Saison 2021 zuerst mal alle Sensordaten „roh“ aufgezeichnet, um den Algorithmus danach mit diesen Daten zu testen. Zum Vergleich habe ich den Output des AirGlide Variometers aufgezeichnet.

Als mein Algorithmus in fast allen Flugsituationen zu mehr oder weniger identischen Ergebnissen kam, habe ich mit den richtigen Flugtests begonnen. Parallel dazu habe ich die Software für die graphische Anzeige auf dem Display entwickelt.

Bei den ersten Flugversuchen mit dem Gesamtsystem ist die Hardware aus verschiedenen Gründen noch ziemlich oft ausgefallen, aber im Sommer 2021 hatte ich dann schon fünf komplett funktionierende Prototypen in den Cockpits meiner LS1-f und denen von vier ausgewählten Testpiloten, die mir ständig Rückmeldung gaben und mir halfen, den Algorithmus serienreif zu machen.





Zur ursprünglichen Entwicklung wurde der Prototyp (Display links) zur Verifizierung mit der Windmessung des AirGlide Variometers verglichen

Zwar habe ich in dem Projekt weitgehend allein gearbeitet und aus verschiedenen Gründen fremde Hilfe bei der Entwicklung manchmal sogar aktiv abgelehnt (*lacht*: denn diejenigen hätten nicht gewusst, worauf sie sich bei mir einlassen), aber als es langsam darum ging, das Gerät in mehr als nur fünf Cockpits zu bringen, wurde mir klar, dass ich die Serienproduktion sowie Marketing und Vertrieb weder allein machen kann noch will. Parallel zu den Flugversuchen ist im Sommer 2021 die Firma RS Flight Systems auf mich zugekommen, und wir haben uns geeinigt, in diesen Punkten zusammen zu arbeiten.

RS hat über das nächste halbe Jahr im Wochentakt Wunder geschehen lassen und mir geholfen, aus dem Prototypen ein marktaugliches Fluginstrument zu machen. Gerade die Beschaffung der Bauteile zu Zeiten der gravierenden Chipkrise war ein absolutes Wunder – auch wenn dies uns am Ende mehrere Monate Verzögerung, großen zusätzlichen Aufwand und auch viel Geld gekostet hat.

Welches sind die herausragenden Produktmerkmale von anemoi?

anemoi ist ein Stand-Alone-Gerät für all diejenigen, die schon ein Vario und ein Navigationssystem haben und trotzdem eine Live-Windanzeige nachrüsten wollen. Das System besteht aus einer Sensorbox und einem kompakten externen Display. Die Anzeige ist unglaublich schnell und zeigt Änderungen in Windrichtung und Geschwindigkeit sofort an. Im Hintergrund zeigt das Display auch den Durchschnittswind als Referenz an.

Außerdem ist ein künstlicher Horizont enthalten, der beispielsweise eine sichere Flucht aus ungeplanten brenzlichen Wolkensituationen ermöglicht. Der Horizont ist für Wettbewerbe abschaltbar.

Wie funktioniert der Windanzeiger in Echtzeit technisch?

Herzstück der Sensorik ist eine hochgenaue Trägheitsplattform mit Beschleunigungs- und Drehratensensoren, die die Bewegung des Flugzeugs in Echtzeit „fühlt“. Diese Daten werden in ein kine-

matisches Bewegungsmodell übersetzt. Aus diesem Modell werden physikalische Größen wie Ground Speed, Track, True Airspeed und Höhe berechnet. Dieselben Größen werden mithilfe von GPS, Stau- und Statikdrucksensoren gemessen, und der Fehler zwischen Modell und Messung wird dazu verwendet, um das Modell stetig zu verbessern und anzupassen. So „lernt“ der Algorithmus, zwischen Messfehlern und Realität zu unterscheiden, und hat jederzeit ein akkurate Bild von der Geschwindigkeit und Lage des Flugzeugs, und eben auch vom Wind.

Warum stellt anemoi die Windrichtung relativ zum geflogenen Heading – und nicht relativ zum Nordkurs – dar?

Wir haben beide Varianten getestet, aber alle Testpiloten und auch ich selbst haben die Einstellung „Heading Oben“ anstelle von „Norden Oben“ als viel nützlicher erachtet. So wird der Wind im Cockpit immer in der Richtung angezeigt, in der er draußen tatsächlich weht, und man muss nicht erst umrechnen, ob der angezeigte Wind jetzt für einen selbst gerade von links, von rechts oder von vorne kommt. Dadurch wirkt der angezeigte Windpfeil wie ein in der Luft stehender Windsack, der immer dabei ist. Gerade beim Fliegen im Gelände ist das ein riesiger Vorteil. Und auch Wellenflieger freuen sich, wenn sie aus dem Rotor ohne Umrechnungen direkt gegen den Wind aufrichten können.

Wie nutzt man die Live-Windanzeige im Flug am besten?

Das wichtigste für mich ist das konstante Lernen durch Beobachtung darüber, wie der Wind durch das Gelände fließt. Wenn ich hundert Hänge abgeflogen und dabei das lokale Um- und Überströmen der Luft sowie den Zustrom zu thermischen Ablösepunkten beobachtet habe, dann werde ich bei Anflug auf den hundert-

und-ersten Hang wahrscheinlich schon eine ziemlich genaue Ahnung haben, was mich erwartet. Und diese Ahnung kann ich dann wieder mit den realen Bedingungen vergleichen und noch weiter dazu lernen.

Der zweite wichtige Punkt ist tatsächlich das Finden von thermischen Aufwinden. Das ist auch das erste, was den meisten neuen anemoi-Piloten auffällt: In den meisten Höhen fließt die Luft tendenziell zu Aufwindzentren hin. Wenn sich nun unter einer großen Wolke oder über einem Berg Rücken der Live-Wind deutlich vom Durchschnittswind unterscheidet, dann kann es sich lohnen, dem Live-Windpfeil nachzufliegen, der einen dann in vielen Fällen direkt in den Bart lenkt. Das gleiche gilt für das Auffinden von tragenden Linien. Man muss sich ein wenig daran gewöhnen, diese Information zusätzlich zu allen anderen Wahrnehmungen richtig zu verarbeiten, aber es funktioniert wirklich gut.

Ganz offensichtlich ist auch das Vermeiden von Lees und das Auffinden von Luvhängen im Gebirge, gerade wenn man tief ist. Ich kann gar nicht aufzählen, wie viele Außenlandungen in den Bergen bei unübersichtlichen Windbedingungen ich dank Live-Windanzeige schon vermeiden konnte. Und wenn es dann doch mal zur Außenlandung kommt, ist es natürlich auch aus Sicherheitsgründen sehr hilfreich zu wissen, welcher Wind einen im Anflug und bei der Landung erwartet.

Ist es möglich oder geplant, irgendwann das anemoi-Signal direkt auf Moving Map-Systemen integrieren und darstellen zu können, etwa XCsoar oder die fest installierten Systeme?

Wir arbeiten derzeit daran, das Protokoll der Datenschnittstelle zwischen Sensor-Einheit und Display offen zu legen. Damit wird es für Drittanbieter möglich sein, die Horizont- und Winddaten aus der Sensorbox mitzulesen auf ihren

eigenen Geräten anzuzeigen. Wir wissen schon von ein paar Herstellern von Varios und Navis, die unsere Daten bei sich anzeigen wollen, und ich kann mir vorstellen, dass auch die Open Source Community (z. B. XCsoar) Interesse daran hat. Live-Wind und Horizont finden sicher einen Platz als Erweiterung auf vielen bereits vorhandenen Geräten.

Wie ist das Gerät bisher im Markt aufgenommen worden?

Wir haben mit einer Start-Auflage von 100 Geräten angefangen, und die waren innerhalb von sehr kurzer Zeit nahezu ausverkauft. Die Geräte für die zweite Auflage, die schon deutlich größer ist, sind vor wenigen Tagen aus der Produktion angekommen.

Das Feedback von den ersten Piloten ist sehr positiv. Besonders gefreut habe ich mich, dass es Piloten gab, die auf der AERO extra den Weg zum RS-Flight Systems-Stand auf sich genommen haben, um sich bei uns für die ersten tollen Flüge mit ihrem Anemoi zu bedanken. Einige Piloten haben

dankenswerterweise auch kritische Rückmeldungen gegeben und wertvolle Verbesserungsvorschläge eingereicht. Solche Inputs setze ich gerne um, wenn es mir möglich ist. Daher gibt es alle paar Monate auch kostenlose Software-Updates, in denen einige Feinheiten immer besser werden.

Wo bekomme ich das Gerät?

Der Vertrieb im deutschsprachigen Raum läuft über Üli's Segelflugbedarf. In andere Länder wird das Gerät direkt über RS Flight Systems vertrieben. (Kosten: ab 1095 EURO)

Wer betreut mich als Kunden nach dem Kauf?

Auch hier ist für deutschsprachige Kunden im Regelfall Üli's Segelflugbedarf der richtige Ansprechpartner. Manche Anfragen werden dann auch zum Hersteller (RS Flight Systems) oder direkt zu mir durchgeleitet, und ich freue mich immer, wenn ich Feedback von einem Piloten empfange oder ein paar zusätzliche Tipps geben kann. ♦

**Zusatzinformation: „Wissen woher der Wind weht“,
segelfliegen magazin 02-22**
<https://www.segelfliegen-magazin.de/ausgaben/2022-2/magazin-info-ausgabe-04-2022/>



Benjamin Bachmaier ist in der Segelflugzene bekannt als Autor des Segelflieger-Blogs „Fluglieber“. Er besitzt einen Master of Science in Luft- und Raumfahrttechnik, Aeronautik und Astronautik und arbeitet als Flight Control System Engineer bei Quantum Systems im bayerischen Gilching, wo er sich mit Flugregelungs-Entwicklung, Implementierung, Simulation und Flugdatenanalyse für unbemannte Flugsysteme befasst.

Benjamin begann mit 14 zu fliegen, erwarb mit 16 die Privatpiloten-Lizenz, wurde mit 19 deutscher Juniorenmeister im Streckensegelflug. Er war fast zwei Jahre lang Sportsoldat der Bundeswehr und wurde mit 21 Fluglehrer.