

Praxistest: 8 Stunden Fahrt durch die Nacht

mit

elektronischer Brennersteuerung

Hilmar Lorenz, Alpen Ballon Club, Oberägeri

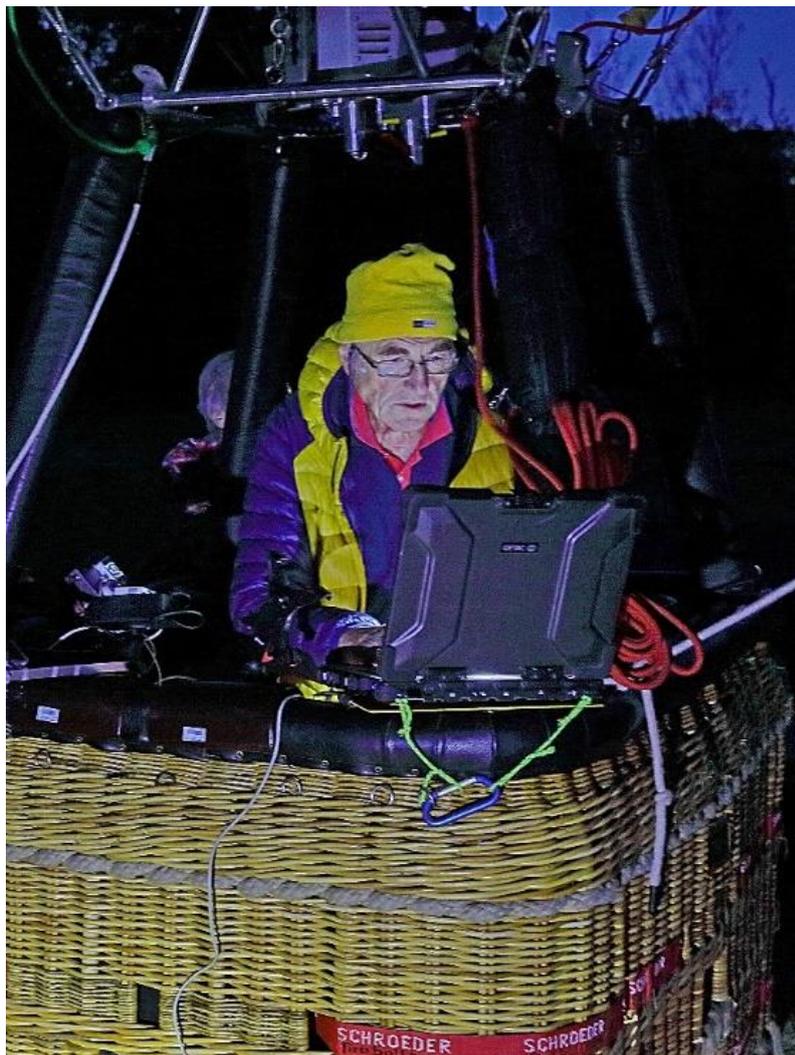
Nachtfahrten mit einem Heißluftballon sind ein besonderes Erlebnis! Wer den Reiz dieses Farbenspiels abends beim Sonnenuntergang und morgens im Wechsel von tiefen Blautönen zum satten Rot bei der vom Nordosten ausgehenden langsamen Morgendämmerung erlebt hat, der kann nicht widerstehen. Fahrten durch die Nacht sind jedoch auch eine Herausforderung. Es stellt sich natürlich vorrangig die Frage nach dem Sinn und den Ergebnissen solcher Unternehmungen. Darauf sollen mit diesem Beitrag Antworten gegeben werden.



Letzte Vorbereitungen auf dem Startgelände bei Treuenbrietzen in Brandenburg am 27. Juli 2022. Foto: Christoph Tatray

Wir haben hier bereits mehrfach unsere Erfahrungen bei Nachtfahrten im Heißluftballon von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang geschildert (vergleiche „Aus Konturen werden Strukturen“ im BSM ... gemeinsam mit Bernd Pulzer und den Bericht zur 8. Thüringer Wald Weifahrt „Kasparov gegen Deep Blue“ BSM 1/15). Die Fahrt, die im Folgenden beleuchtet wird,

sollte eigentlich schon ein Jahr früher stattfinden. Dazu waren am Abend des 21. Juni 2021 alle Vorbereitungen getroffen, die Wettervorhersagen bestens und das Aufrüsten des Ballons weit vor Sonnenuntergang abgeschlossen. Wir planten eine



Das Aufstellen des Ballons erfolgte diesmal selbstverständlich nach ausführlichem Test der Technik, dem ich mich dank des profunden Starterteams konzentriert widmen konnte. Foto: Christoph Tatray

Solofahrt mit weiter vervollkommener Steuersoftware in der PC Variante mit dem bewährten externen Steuergerät (siehe <https://hballon.com>). Jedoch: An diesem Abend konnte kurz vor dem Start keine Verbindung von Rechner und Magnetventilen aufgebaut werden!

Der Ärger über die verpasste Chance saß naturgemäß tief. Als Ursache der unerwarteten Funktionsstörung der Steuerung stellte sich letztlich ein fehlerhaftes Windows Update heraus. Diese negative Erfahrung zeigte unmissverständlich, dass die Ballonsteuerung zwar nach der langen Entwicklungszeit bestens funktionierte, die Technik sowie der Rechner jedoch anfällig blieben. Wir hatten mehrfach darüber nachgedacht auf Prozessortechnologie umzustellen, wie etwa die ESP32 Basis. Aber eine Neuentwicklung zu wagen, dafür fehlte der Entschluss. Mit der tiefen Enttäuschung vom abgebrochenen Start zur ersehnten Nachtfahrt im Bauch und der wenige Tage alten neuen Bekanntschaft mit Vincent Amon und Michael Haberler aus Österreich im Kopf, die ein kompaktes Ballon-Vario auf der ESP32 Technologie mit integriertem Display und einem von Vincent konzipierten Temperatur- und Baromodul geschaffen haben, wurde ab sofort intensiv- auf die neue Technologie portiert und notwendigerweise wieder programmiert.

Ein kurzer Rückblick: Der Traum, einen Autopiloten im Heissluftballon einsetzen zu können, ist alt. Es gibt unzählige Projekte zu diesem Thema, aber in der Praxis funktionierende Systeme sind eher rar. Der Heissluftballon ist mit seiner auf dem Auftriebsprinzip beruhenden Wirkungsweise physikalisch einfach zu modellieren, aber Materialeigenschaften der Ballonhülle,

meteorologische Bedingungen und nicht zuletzt die solare Einstrahlung machen das System hochgradig nichtlinear, somit nur schwer rechnerisch bestimm- und vorhersehbar. Damit kommen elektronische Steuerungen schnell an ihre Grenzen.

Übergibt man die Steuerung der Brennerimpulse einem Rechner, so stellt sich nach kurzer Zeit heraus, dass ein Heissluftballon wahrhaftig ein ganz schön störrisches Gefährt ist. Im ausgeglichenen Fahren funktioniert was der Computer errechnet, aber irgendwann beginnt der Ballon zu fallen und kein Rechenprogramm und keine Steuerung fängt ihn ohne ein „Überschiessen“ und daraus resultierende Instabilitäten wieder auf. Genau dieses Verhalten führt auch beim unaufmerksamen manuellen Fahren zu übermäßigem Gasverbrauch. Hier sollte unsere Steuerung ansetzen, den Piloten entlasten und den Gasverbrauch beim kontrollierten Heizen signifikant senken.

Verallgemeinerungen im physikalischen Verständnis der Fahrzustände eines Heissluftballons sind Voraussetzungen, um programmiertechnisch Steuerungsaufgaben zu realisieren. Doch die eigentliche Herausforderung scheint zu sein, die Kunst des erfahrenen Ballonpiloten im vorausschauenden, situationsbestimmten Heizen dem Computer beizubringen. Die genialen Ideen zur Lösung derartiger Aufgaben wurden lange vor dem Computerzeitalter durch Prof. Rudolf E. Kalman in den 60er Jahren entwickelt. Der von ihm entwickelte Algorithmus überzeugte wie kaum eine andere mathematische Theorie bei der Realisierung der Mondlandungen im Apollo-Programm der NASA. Sie zählt bis zum heutigen Tag in Raumfahrt, Aerodynamik und zur Lösung von komplexen Steuerungsaufgaben zum leistungsfähigsten Handwerkzeug der Techniker und Programmierer.

Dem Heissluftballon wird mit Hilfe des Kalman-Filterprozesses, der nun auf die ESP32 Prozessortechnologie umgesetzt werden konnte, nur die unbedingt notwendige Energie möglichst «genau für den nächsten Heizimpuls dosiert zum optimalen Zeitpunkt» aus der aktuell beobachteten Dynamik des Ballons über den mit Magnetventilen betätigten Brenner zugeführt. Wir berechnen über Kalman aus den barometrischen Druckwerten die Beschleunigungen oder im physikalischen Sinn die resultierenden Kräfte am Ballon und schätzen ihre erwartete zeitliche Änderung. Im nächsten Heizschritt wird dann die tatsächlich eingetretene «Kraftänderung am Ballon» mit der Vorausberechnung verglichen und im nun folgenden Schritt mit dem gemessenen Fehler korrigiert. Der Vorteil des Einsatzes der neuen ESP32 Technologie für das seit Jahren in unserem Ballon funktionierende Verfahren anstelle eines Computers liegt darin, dass der Prozessor ausschließlich diese Steuerungsaufgabe quasi „eingebrennt“ im System vorliegen hat, beliebig an- und abgeschaltet werden kann, kaum eine Zigarettenschachtel groß ist und nur noch minimal Energie zum Betrieb benötigt. Somit also genau die entscheidenden Nachteile überwunden werden konnten, die bisher einer breiten Nutzung unserer Steuerung entgegenstanden. Was blieb war eine neue Nachtfahrt zu planen und die Praxistauglichkeit auch hinsichtlich Systemstabilität und der Optimierung des Gasverbrauches zu testen.

Wie in den vorhergehenden Beiträgen hier im Ballonsportmagazin beschrieben, sind objektive Daten zum Gasverbrauch im Heissluftballon durch den signifikanten Einfluss der Sonneneinstrahlung und ständig wechselnde Beladungs- und Wetterbedingungen schwierig zu quantifizieren. In der Nacht sind nicht nur „alle Katzen grau“ sondern der „störende“ Einfluss der Sonne entfällt. Daher sind bei langen Fahrten durch die Dunkelheit die Berechnung bzw. Abschätzung des Propanverbrauchs eher möglich. Wir wissen sehr gut, um wie viel leichter wir im Verlaufe der längeren Fahrt werden. Damit lässt sich ein Gleichungssystem mit unterschiedlicher „Beladung“ aufbauen, welches die Verhältnisse in der Atmosphäre wie Druck, Temperatur und Feuchte aus meteorologischen Modellierungen bzw. Sondierungen hinreichend genau mit den unbekanntem Parametern der Energetik unseres Ballons abbildet. Damit ist das Experiment schon umrissen und die Möglichkeit vorgezeichnet die Vielzahl der Einflussgrößen im Nachhinein rechnerisch zu bestimmen.

Also: Eine Fahrt durch die Nacht soll uns detaillierte Verbrauchswerte zur späteren Auswertung und der Berechnung des Gasverbrauches, des solaren Beitrags sowie des Anteils der Infrarotstrahlung von Erde und Atmosphäre an der Energiebilanz des Ballons liefern.

Die Zeit um die Sommer-Sonnenwende bietet sich für unsere Ziele an. Leider war es terminlich bzw. wetterbedingt nicht möglich die kürzesten Nächte zu nutzen. Die letzte Dekade im Juli erfordert schon Autonomiezeiten von 8 Stunden, um sicher durch die Nacht zu kommen. Eine Herausforderung für die Missionsberechnung hinsichtlich Propanverbrauch und Optimierung der Beladung. Auch wollten wir diesmal dem fortgeschrittenen Alter Tribut zollend auf eine Solofahrt verzichten. Mit Jens Berger hatte sich ein erfahrener, nachtfahrerprobter Gasballonpilot bereiterklärt mitzukommen. Die nebenstehende Tabelle zeigt die im Voraus simulierten, die im Nachhinein berechneten, optimalen Verbrauchswerte verglichen mit dem gemessenen, realen Verbrauch für unsere Fahrt am 27. Juli 2022. Die zugrundeliegenden meteorologischen Daten steuerte Fabienne Muriset bei. Ihr reicher „Gordon Bennett“ Erfahrungsschatz, das präzise analytische Bewerten der Modelldaten, aber insbesondere auch das strukturierte Vorstartbriefing waren wesentliche Elemente, dass unsere Unternehmung bestmöglich vorbereitet werden konnte und sich damit so viel als möglich Unsicherheitselemente ausschließen ließen. Dafür möchten wir uns auch an dieser Stelle nochmals herzlich bei Fabienne bedanken.

Emotionen pur

Die prognostizierte Fahrtroute mit dem Start bei Treuenbrietzen war über Tage stabil und mit der Unterstützung von Christoph Tatrav & Sebastian Hanisch stand uns ein erfahrenes Starterteam zur Seite. Beide haben unsere Entwicklungen über Jahre begleitet und bei der Optimierung der Ausrüstung für Dauerfahrten geholfen.



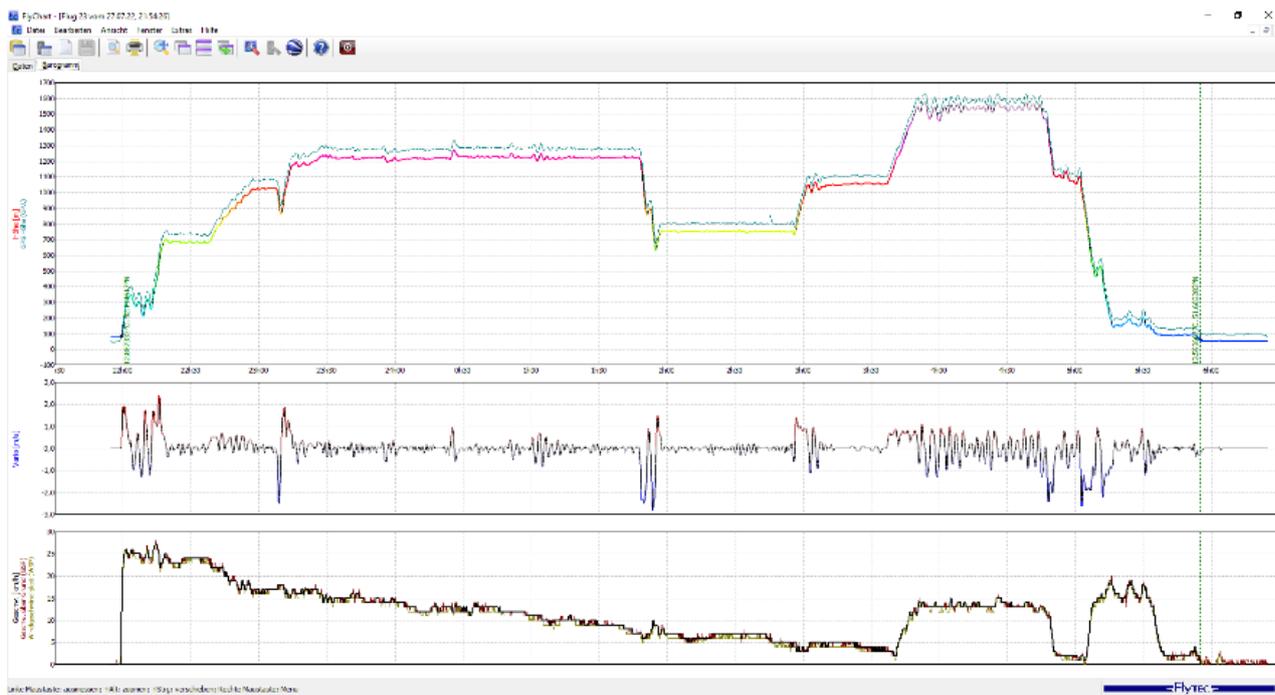
21:55 Uhr. Alle Systeme laufen. Wir sind startklar und 5 Minuten später in der Luft. Foto: Christoph Tatrav

Ballontechnisch hatten Christoph, Sebastian, Jens und Angelika den Schröder HB-QND - einen 4250er mit dem FB6 Magnetventilbrenner - im Handumdrehen startklar. Wir hoben pünktlichst zum geplanten Zeitpunkt um 22 Uhr (lokal) im letzten Dämmerlicht mit exakt der vorher im Team diskutierten Hüllentemperatur ab.

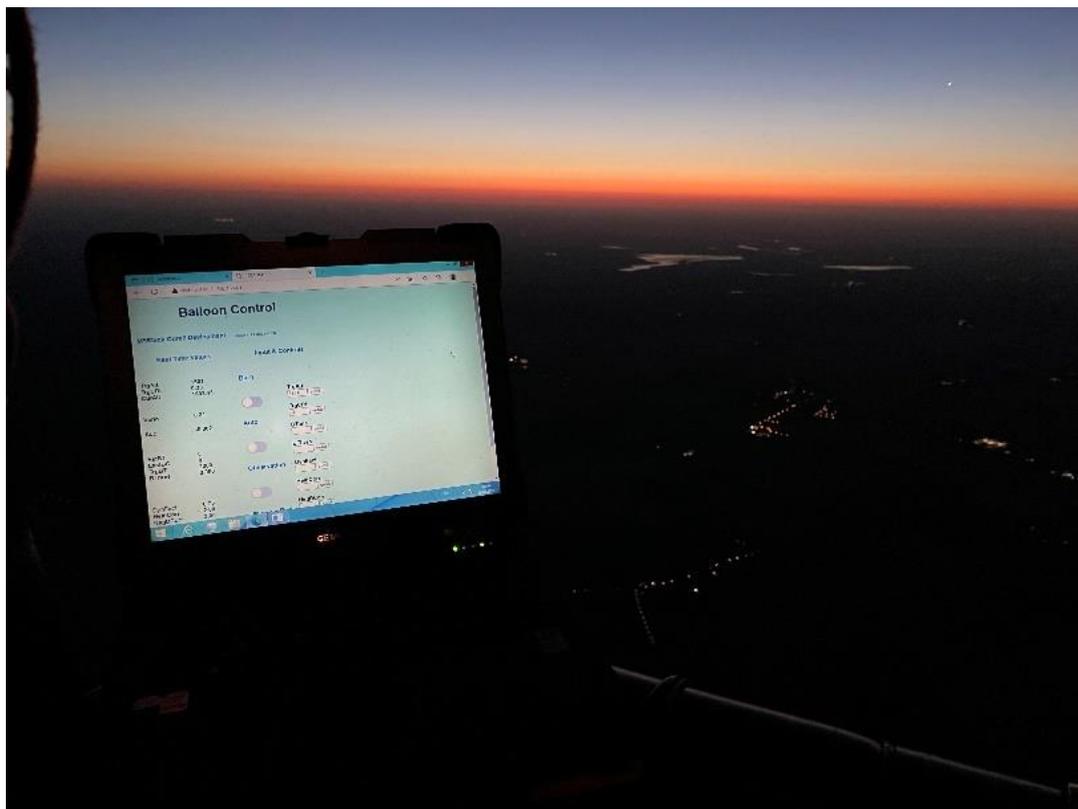
Also Zuladung und Umgebungsbedingungen wie berechnet. Auf Sicherheitshöhe schalteten wir auf unsere kompakte Steuerbox um: Einen M5Stick Core2, integrierte 4fach Relaiskarte (je 2 aus Redundanzgründen gekoppelt) und zur Genauigkeitssteigerung 3 per WLAN verbundene Slaveprozessoren - ebenfalls aus der M5 Controller Reihe stammend. Über die technischen Details der prozessorspezifischen Umsetzung sowie der zusammengeführten Lösungselemente wird hier gesondert gemeinsam mit Vincent und Michael als Kern des inspirierenden und profunden Entwicklerteams berichtet werden.

Das autonome System diente fortan als Fahrhilfe und die Steigfahrt unseres schweren Ballons erfolgte nun schon „prozessorgesteuert“ gleichmäßig mit durchschnittlich 0.5 m/s. Von diesem Zeitpunkt ab wurden die Fahrventile des FB6 Brenners nur noch zum Flaschenwechsel, dem anschließenden Testbrennen per Hand und dem Abstieg zur Landung berührt. Die Hüllentemperatur lag kurz nach dem Start in der Steigfahrt im erwarteten Bereich von 84°C. Es dunkelte schnell. Schon waren kaum noch Strukturen auf der Erdoberfläche auszumachen. Die Konturen der Nacht und die beleuchteten Siedlungen boten einen eindrucksvollen Kontrast. Jens machte die ersten Positionsbestimmungen, hatte die zahlreichen Windparks im Blick und Hilmar die diversen Displays von Navi, Vario und Steuerung im Auge. Die elektronische Steuerung der Brennerventile funktionierte wie ein Schweizer Uhrwerk. Unser Ballon gewann gleichmäßig an Höhe. Der obligatorische Kontakt zur Flugsicherung war stabil und in dieser Nacht besonders hilfreich. Herzlichen Dank an die Deutsche Flugsicherung und die Lotsen im Nachtdienst, insbesondere auch für die freundliche Unterstützung mit aktuellen Wetter- und Winddaten und der Abstimmung bzw. Navigation in der Nähe des großen Waldbrandgebietes nahe Falkenberg in Brandenburg.

Wie aus dem beigefügten Höhenprofil ersichtlich erfolgte die Höhenreglung über Stunden mit der unglaublichen Genauigkeit von +/- 8 m.



Vollständige Dokumentation des 8 stündigen Fahrtverlaufs im Flytec 6040: Man beachte die stabile, mit Hand nie erreichbare Höhengenaugigkeit von 6-8 m Standardabweichung über Stunden! Die zwischenzeitlichen Variationen resultierten vom Flaschenwechsel und den jeweiligen anschließenden händischen Brenntests. Damit lässt sich über dies die Brenndauer der einzelnen Zylinder gut zuordnen und verifizieren.



Unser Webinterface der neuen „Balloon Control“ auf M5Stack Core2 Basis. Alle relevanten Steuerparameter werden dargestellt und können neben dem Display am Controller auch über WLAN und Web im Korb interaktiv verändert werden. Hier der Status um 2:19 UTC. Angezeigt oben die „Sollhöhe“ 1501 m, darunter „Aktuelle Höhe: 1502.46 m, „Aktuelle Steigrate“ Vario: 0.31 m/s, „Aktuelle Beschleunigung“ ACC: -0.002 m/s². Letztere entspricht einer in diesem Moment abwärts gerichteten, resultierten Kraft am Ballon von etwa 12 N. Foto: Hilmar Lorenz

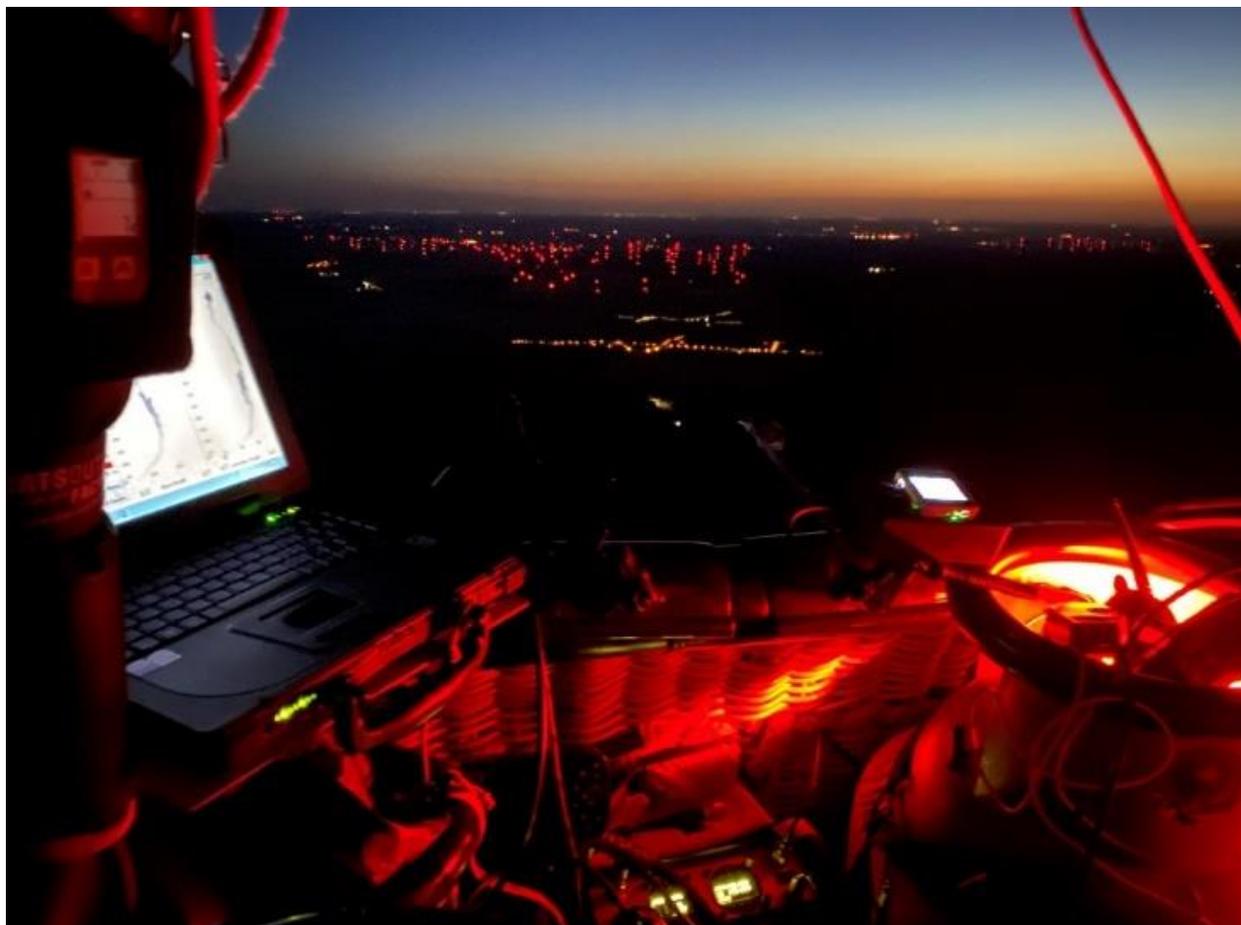
Nach etwa 45 Minuten Fahrt begann sich die Füllstandsanzeige der ersten 40 kg Flasche zu bewegen. Dieses Zeitintervall war schon mal gut. Schließlich versorgte uns die erste Flasche 71 Minuten mit Gas. Wir hatten mit 66 Minuten gerechnet. Das waren sogar 5 Minuten mehr als abgeschätzt. Es hellte sich das Gesicht auf, denn damit sollte der berechnete Gasvorrat mit genügend Reserve für die Fahrt durch die Nacht reichen. Das Bild wiederholte sich mit Flasche Zwei. Hier schon eine positive Abweichung von 7 Minuten zur abgeschätzten Brennzeit von 70 Minuten. Alle Verbrauchsdaten und die vor der Fahrt mit Hilfe Fabiennes Vertikalprofil berechneten Werte sind in Tabelle 1 verzeichnet.



Zum Vergleich, das „Nutzerinterface“ des alten Systems. Links auf dem Display die früher notwendigen Steuerparameter. Rechts die außerordentlich nützlichen Übersichten zu „Richtung über Höhe“ und „Groundspeed über Höhe“. Diese Darstellungen haben sich über Jahre bewährt. Deshalb ist das Notebook auch gegenwärtig als Anzeigegerät und zur Kontrolle noch immer mit im Korb. Bei dieser Nachfahrt wurden darüber hinaus noch Vergleichsdaten zur späteren „Offline“ Verifizierung der gerechneten Steuerimpulse gewonnen. Hier der Status während unserer Fahrt: 0:34 UTC. Foto: Hilmar Lorenz

Rationales der Nacht

Die Sichten waren hinreichend gut und der Sternhimmel klar. Leider hatte ich diese Nacht keinen Blick für Sterne. Jens berichtete über Sternschnuppen, meine Begeisterung galt diesmal jedoch der Präzision der Steuerung.



Romantik im Instrument-beleuchteten Ballonkorb. Im Osten sind schon zarte Anfänge der morgendlichen Dämmerung mit dem Übergang von den tiefen Blautönen zum zarten Rosa wahrnehmbar. Im noch starken Kontrast dazu das tiefe Rot der allgegenwärtigen, blinkenden Windparks. Foto: Jens Berger

Bei allen Eindrücken und Emotionen dieser Nachtfahrt: Welche Antworten liefert uns der Ballon auf unsere wichtigste Frage, den Gasverbrauch? Schon in der Endphase der Planung zur Fahrt war klar geworden, dass die zu erwartenden meteorologischen Bedingungen in Bezug auf den Gasverbrauch durch die Dauer der dunklen Nacht anspruchsvoll werden würden. Die Prognose-Vertikalprofile zeigten für Ende Juli die zu erwartenden hohen Temperaturwerte und auch relativ hohe Feuchtigkeit. Was sich in jedem Falle abzeichnete war eine hohe Luftfeuchtigkeit auch in oberen Luftschichten. Dies könnte zu Unsicherheiten in den Gasverbrauchsrechnungen führen. Genau deshalb wurde mit so hoher Spannung das Aushebeln der ersten Flasche erwartet. Früh wurde während der Fahrt nicht nur klar, dass die mit viel Aufwand berechneten Werte keine grundsätzlichen Fehler aufwiesen, sondern die sanfte Steuerung offensichtlich weiterhin beeindruckend niedrige Verbrauchswerte erwarten ließ.

Unser Gasverbrauch begann eingangs der Nacht mit einem Wert von 33.8 kg/h. Die letzte Flasche vor der Landung und noch bei absoluter Dunkelheit betrieben ergab mit dem nun leichten Ballon knapp 27 kg/h. Sensationell für eine Fahrt durch die Nacht ganz ohne solaren Beitrag! Wie sind diese Werte einzuschätzen? Wir konnten mit Bernd Pulzer vor 11 Jahren bei der auch hier im Ballonsportmagazin dokumentierten Fahrt unter ähnlichen atmosphärischen Bedingungen, Fahrhöhen und Belastung des Ballons Vergleichswerte zwischen 43 kg/h und 31 kg/h messen. Somit führt uns der direkte Vergleich zu mehr als 20% niedrigerem Gasverbrauch. All dies mit einer nun in der Zwischenzeit 15 Jahre alten und häufig alpin in großen Höhen mit hohem UV Anteil genutzten Hülle!

Aber besonders eindrücklich waren die Unterschiede während der Steigphase. Sie lief diesmal absolut gleichmäßig und sanft. Wir benötigten 2011 9.3 kg/h oder 27% mehr Gas als nun in Brandenburg! Da sich die Zunahme der Hüllentemperatur aus

ausgeglichener Fahrt quadratisch mit der momentanen Steigrate erhöht und somit die Energieabstrahlung in vierter Potenz zur Oberflächentemperatur der Hülle wächst, ergeben sich hier Extreme beim Vergleich von manuellem zu geführtem Fahren beim Steigen. Zumal zusätzlich jedes „Durchsacken“ und das notwendige „Abfangen“ den Energieeinsatz beim manuellen Fahren nochmals drastisch vergrößert.

Tabelle 1 gibt in der rechten Spalte auch abgeschätzte Werte mit hypothetischer Sonneneinstrahlung von 600 Wh/m^2 wieder. Daraus lässt sich die nächste interessante Größe ableiten: Die Sonne leistet bei unserem Sport 30% bis 35% Energiebeitrag! Frage: Welches Verkehrsmittel mit bewegten Massen von mehreren Tonnen kann solche prozentualen Beiträge aufweisen? Ja, absolut sind wir wohl beim Ballonfahren als energieintensiv einzuschätzen, aber das zukünftige Entwicklungspotential in unserem Sport mit automatischer Steuerung und „Solar“ Ballon wird mehr als deutlich!



Mittels Computertechnik und Elektronik an Bord wird das Fahren und Navigieren besonders unter nächtlichen Bedingungen beträchtlich vereinfacht. Noch vor der Morgendämmerung war dem alten Notebook der Strom ausgegangen. Die Kontrolle erfolgte fortan auch beim manuellen Abstieg und der Landung über das Webinterface der Steuerung. Rechts ist als weiteres M5Stack Core2 unser „Monitoring System“ an Bord zu sehen. Damit wurden über die gesamte Fahrt Luftfeuchtigkeit, Außen- und Hüllentemperatur aufgezeichnet, die in die oben dargestellten analytischen Auswertungen eingingen.

Hinweis: Der über die Korbwand reichende und mit grauem Band provisorisch befestigte Sensor ist ein ToF IR Laser „Abstandsradar“ mit 180 m Reichweite, der in Zukunft zusammen mit der Steuerung eingesetzt werden soll und in Bodennähe sicherheitsrelevante Funktionen haben wird. Foto: Hilmar Lorenz

Flaschenmanagement			Berechnungstabelle (alle Zeiten MESZ)									
Position	Gewicht [kg]	Anschlusszeit	Brenner	Abschlusszeit	Brennzeit	Verbrauch [kg/h]	Brennzeit [h]	Brennzeit [min]	Verbrauch Vorhersage [kg/h]	Brennzeit Vorhersage [min]	Brennzeit Differenz [min]	simul. Verbrauch 600 Wh/m ² [kg/h]
1	30	4:45					0.00					
2	40	22:00		23:11	1:11	33.80	1.18	71	32.30	74	-3	23.50
3	40	23:11		0:25	1:14	32.43	1.23	74	31.00	77	-3	21.40
4	30	4:45					0.00					
5	40	3:16		4:45	1:29	26.97	1.48	89	27.10	89	0	19.40
6	Aufrüstflasche				0:00		0.00					
7	40	0:25		1:48	1:23	28.92	1.38	83	29.60	81	2	18.10
8	40	1:48		3:16	1:28	27.27	1.47	88	28.20	85	3	19.40
Landzeit:		5:55										
Fahrzeit:		7:55										

Tabelle 1: Simulations- und Verbrauchsdaten.

Fazit:

Die elektronische Brennersteuerung ist in der vorliegenden Entwicklungsphase weit mehr als eine Fahrhilfe für den Piloten. Die nachgewiesene Stabilität sowie Genauigkeiten von +/- 8 m über Stunden in der absoluten Höhensteuerung und darauf basierend mehr als 20% Verbrauchseinsparungen sind manuell kaum erreichbar. Was Prof. Kalman seinen Studenten mathematisch korrekt beweisen konnte: Aus barometrischen Daten lässt sich durchaus ein verwertbares Signal filtern, solange man die statischen Eigenschaften des Messensors kennt und die Bewegungsgesetze des Systems physikalisch beschreiben kann. Damit lassen sich viele Tonnen träge Ballone zuverlässig vorausschauend steuern. Unsere Nachfahrt von Sonnenuntergang zu Sonnenaufgang belegte zudem überzeugend, dass moderne Technologien und Algorithmen, die u.a. bei der Mondlandung und in der Raumfahrt ihre Feuertaufe bestanden, auch uns im Ballonsport als älteste Sparte der Luftfahrt Wege der Entwicklung in Zukunft und hin zu besserer Energieeffizienz weisen.