

## Wasserdruckrad für Fallhöhen unter 1 m und Leistungen bis 30 kW

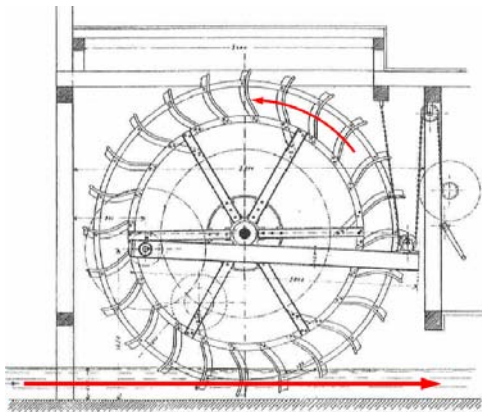
Müller Gerald

Das Wasserdruckrad wurde als Energiewandler für niedrigste Fallhöhen von 0,1 bis etwa 1m entwickelt. Theoretische Arbeiten und Modellversuche zeigten dass der Wirkungsgrad mit abnehmender Fallhöhe zunimmt und 60 bis 90% beträgt. Der grosse Schaufelabstand und die kontinuierliche Sohle lassen gute ökologische Eigenschaften erwarten, die sehr einfache Konstruktion mit einer neuartigen hydraulischen Lastabnahme deutet auf niedrige Baukosten hin. Mit dem Wasserdruckrad kann das vorhandene Potenzial an Wasserkraft mit niedrigsten Fallhöhen möglicherweise in wirtschaftlicher und ökologisch verträglicher Form genutzt werden.

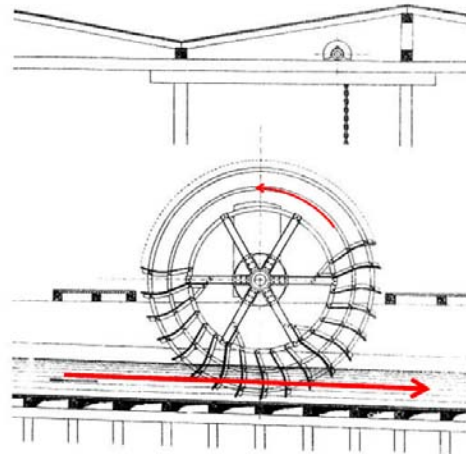
The Hydrostatic Pressure Wheel was developed for the exploitation of hydropower with very low head differences between 0.1 and 1.0 m. Theoretical work and model tests showed that the efficiency ranges from 60 to approximately 90%, and increases with reducing head differences. The large distance between blades, and the continuity of the bed indicate good ecological potential. Its very simple construction with a novel hydraulic power take-off system make the wheel cost-effective. With the Hydrostatic Pressure Wheel, the existing hydropower potential with very low head differences can potentially be utilised economically in an ecologically acceptable way.

### 1 Einleitung

Für die Nutzung der niedrigsten Fallhöhen zwischen 10 cm und etwa einem Meter gibt es nur wenige geeignete Wasserkraftmaschinen, wobei die Mehrzahl kinetische Energiewandler mit niedrigem Wirkungsgrad darstellen. Dabei wird die Fallhöhe genutzt um das Wasser zu beschleunigen; das Wasserrad wandelt dann die kinetische in mechanische Energie um. Der einfachste Energiewandler ist das Stromrad im unterkritischen Abfluss, Abb. 1a. Der theoretische maximale Wirkungsgrad dieser Stromräder ist 29,6%. Abb. 1b zeigt ein Stromrad in schiessendem Abfluss,  $D = 5.2$  m. Der maximale theoretische Wirkungsgrad dieses Stromrads im Schussgerinne beträgt 40%. Eine weitere Variation des Themas ist das sogenannte Poncelet-Rad, Abb. 2a, dessen Wirkungsgrad üblicherweise als etwa 60% angegeben wird, während Poncelet's Versuche Wirkungsgrade von 42 bis 56% ergaben, Weisbach (1883).



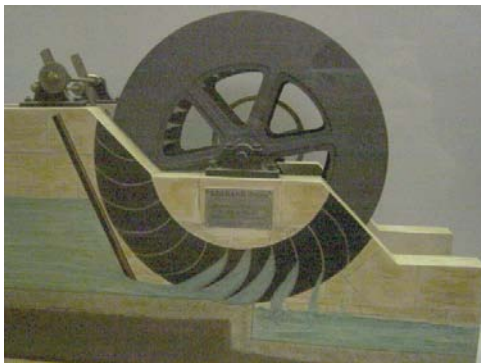
a. Stromrad, Müller (1899)



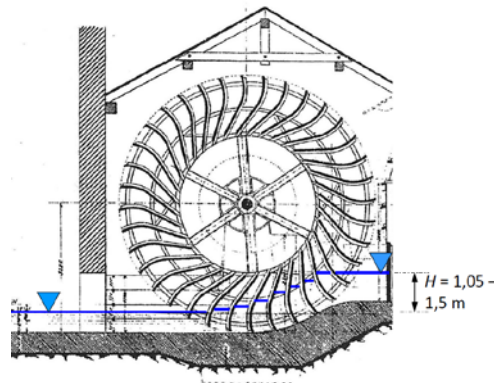
b. Stromrad im Schussgerinne

### Abbildung 1 Impulsräder

Sogenannte Zuppinger - Niedergefällerräder wurden für Fallhöhen grösser als etwa 0,7 m verwendet. Diese Räder hatten jedoch Durchmesser von 6 – 7,5 m, und eine hohe Schaufelzahl (36 – 42 Schaufeln) so dass ein hoher Bauaufwand erforderlich war. Abb. 2b zeigt ein typisches Beispiel ( $D = 6.5 \text{ m}$ ,  $\eta = 68\%$ ).



c. Poncelet-Rad



d. Zuppinger-Niedergefällerrad, Müller (1899)

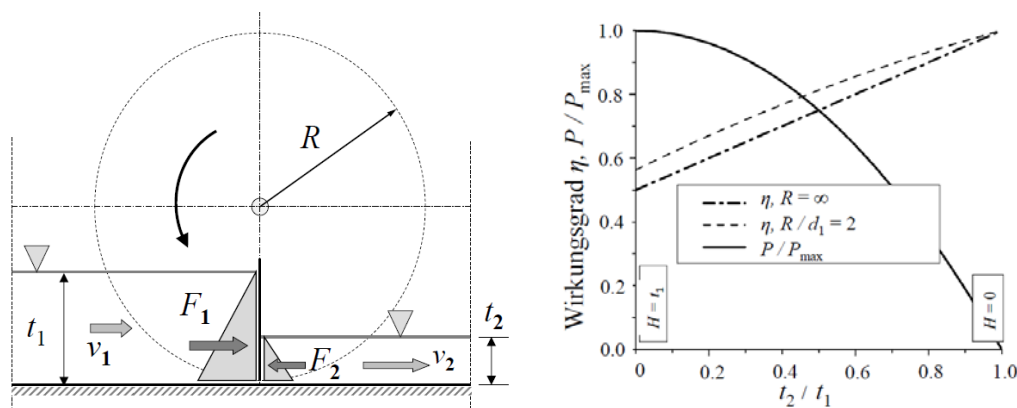
### Abbildung 2 Niedergefällerräder

## 2 Das Wasserdruckrad

### 2.1 Theorie

Basierend auf theoretischen Überlegungen wurde an der Universität Southampton das Wasserdruckrad als Energiewandler für niedrigste Fallhöhen entwickelt, Müller und Senior (2007). Das WDR besteht aus einem einfachen Wasserrad mit geraden radialen Schaufeln welche am Boden in einer Krümmung die einem Schaufelabstand entspricht laufen. Das WDR schliesst damit den Wasserspiegel oberstrom gegenüber dem Abfluss unterstrom ab, und

funktioniert als ein Wehr, Abb. 3a. Sobald das Rad sich dreht, fließt das Wasser oberstrom mit einer Geschwindigkeit  $v_1$ , unterstrom mit einer größeren Geschwindigkeit  $v_2$ . Dabei wirken zwei unterschiedlich grosse hydrostatische Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  auf die Schaufel und erzeugen eine Leistung  $P$ , die dem Produkt aus wirkender hydrostatischer Kraft  $F_{\text{hyd}} = F_1 - F_2$  und der Vorwärtsgeschwindigkeit  $v_R (= v_1)$  des Rades entspricht.



a. Prinzip

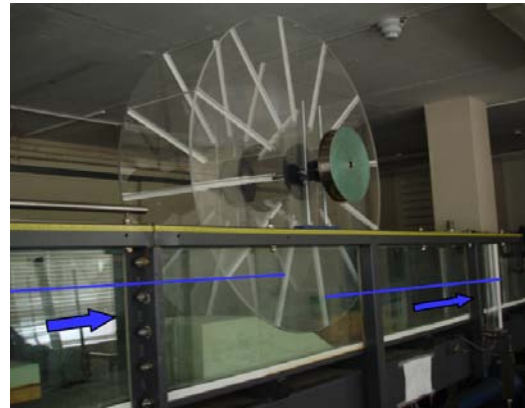
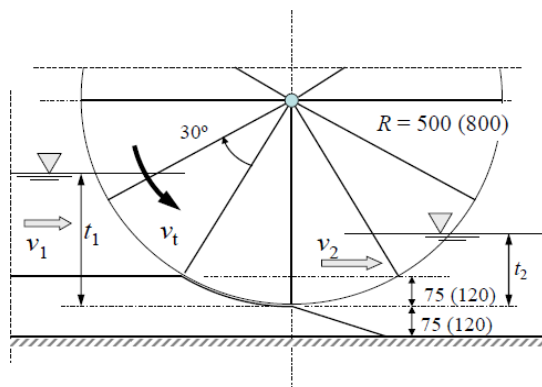
b. Theoretische Wirkungsgrade

**Abbildung 3** Wasserdruckrad – Theorie, Senior et al. (2010)

Eine genauere Betrachtung zeigt dass die hydrostatischen Kräfte wegen ihrer unterschiedlichen Position auf dem Rad mit endlichem Radius unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen; dies erhöht den Wirkungsgrad etwas. Abb. 3b zeigt den Wirkungsgrad für zwei Fälle (unendlicher Radius,  $R = 2 t_1$ ); der Wirkungsgrad beträgt 50% für  $t_2 / t_1 = 0$ , und steigt auf den theoretischen Wert von 1,0 für  $t_2 / t_1 = 1$ .

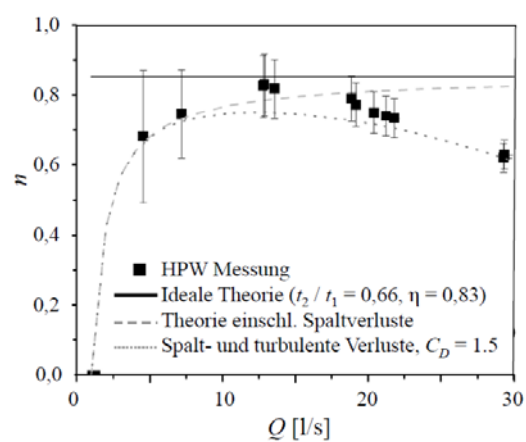
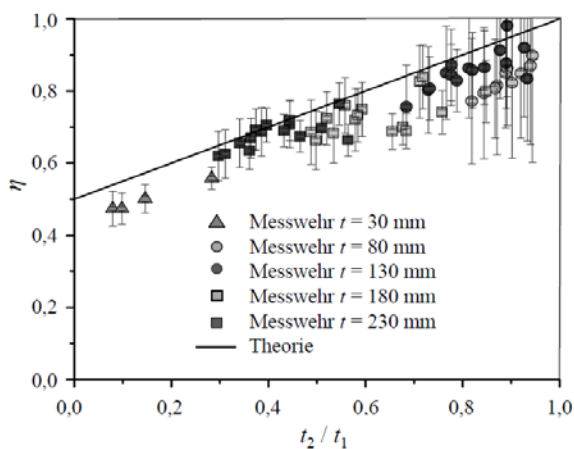
## 2.2 Versuche

Um die Theorie zu überprüfen, wurden an der Universität Southampton zwei Serien von Modellversuchen mit Raddurchmessern von 1,00 und 1,80 m durchgeführt. Abb. 4a zeigt eine Seitenansicht der Modelle (die Maße in Klammern gelten für das Rad mit 800 mm Radius), Abb. 4b das 500 mm Modell im Stömungskanal. In Abb. 4c ist der Wirkungsgrad als Funktion von  $t_2 / t_1$  für das 500 mm Rad gezeigt. Der maximale Wirkungsgrad liegt sehr nahe am theoretischen Wert und bestätigt die Theorie sowohl was Werte als auch den Parametereinfluss angeht. Abb. 4d schließlich zeigt den Wirkungsgrad als Funktion der Schaufelgeschwindigkeit bzw. des Durchflusses. Um den Einfluss der Verluste theoretisch zu erfassen, wurde ein vom Quadrat der Geschwindigkeit und einem Verlustbeiwert abhängiger Verlustterm in die Summe der Kräfte eingeführt.



a. Modellgeometrien und -maße

b. Seitenansicht

c. Wirkungsgrad  $\eta$  als Funktion von  $t_2 / t_1$ d. Wirkungsgrad  $\eta$  als Funktion von  $Q$ **Abbildung 4** Wasserdruckrad – Modellversuche ( $R = 500$  mm)

### 3 Bewertung

Das Wasserdruckrad ist ein sehr einfacher Energiewandler dessen Wirkungsgrad mit abnehmender Fallhöhe zunimmt, und den Bereich von 57% bis über 90% abdeckt. Damit ist theoretisch die Möglichkeit gegeben auch kleinste Fallhöhen von 10 cm aufwärts kostengünstig zu nutzen. In der Praxis ergeben sich allerdings einige Nachteile:

1. Bei grösseren Radgeschwindigkeiten steigen die turbulenten Verluste sehr stark an.
2. Die Drehzahlen im Vollmasstab sind mit 1,5 bis etwa 4-5 U/min relativ gering; es entstehen sehr grosse Drehmomente welche kostenaufwändige Getriebe notwendig machen.
3. Der Betrieb muß drehzahlvariabel sein um wechselnde Wassermengen bei gleichbleibenden Wasserständen verarbeiten zu können.

Weitergehende Arbeiten zielen daher zum einen auf die Verringerung der turbulenten Verluste. Die vielfältigen Anforderungen – ökologische Verträglichkeit und Wirtschaftlichkeit – zusammen mit den spezifischen neuen

Eigenschaften des Rades (Sohlkontinuität, hohe Drehmomente) bedeuten jedoch dass eine Optimierung der hydraulischen Eigenschaften bei weitem nicht ausreicht um eine funktionale, wirtschaftliche und ökologisch akzeptable Lösung zu erreichen. Dies führte zur Notwendigkeit einer Systementwicklung welche Hydraulik, Ökologie, Maschinentechnik, Lastabnahme und Steuerung umfasst.

### 3.1 Verluste

Die Wirkungsgradkurve in Abb. 4b zeigt deutlich den Einfluss der Spaltverluste bei niedrigen Durchflüssen. Spaltverluste dominieren den unteren Leistungsbereich. Um diese Verluste zu minimieren, und um die Durchgängigkeit für Sediment zu ermöglichen, wurde die Unterkante der Schaufeln in eine Richtung biegsam gestaltet. Dies erlaubt im Vollmasstab eine geringe Spaltbreite von weniger als 3 mm.

### 3.2 Konstruktion

Insbesondere bei Anlagen mit kleinen Leistung sind Kostenbetrachtungen entscheidend wichtig. Dies hat zur Verwendung von einfachen Stahlrohren als Hohlwellen für die Achse geführt. Die Struktur des Rades ist denkbar einfach; zwei kreisförmige Flansche werden mittel Manschetten auf die Welle aufgebracht. An den Flanschen sind dann die Schaufeln als gerade Schaufelblätter die durch einfache Stahlprofile gehalten werden befestigt. Abb. 5 zeigt ein 1,80 m Grossmodell das in dieser Form gebaut wurde und derzeit getestet wird, dort ist auch die flexible Schaufelunterkante deutlich sichtbar.



**Abbildung 5** Modellversuch  $D = 1,90$  m,  $P = 200$  W

### 3.3 Ökologische Verträglichkeit

Gegenwärtig wird ebenfalls die Fischdurchgängigkeit des WDR mittels Versuchen am im Bild 5 gezeigten Modells durchgeführt; zunächst um den Einfluss der vom Rad erzeugten Turbulenz festzustellen. Dabei zeigte sich dass die Fische weder durch die von den Schaufeln erzeugte Turbulenz noch durch die Geräusche abgeschreckt werden. Weitere Versuche zur tatsächlichen Durchgängigkeit werden vorbereitet. Aufgrund der relativ grossen Schaufelkantenabstände (selbst im Modell sind es 47 cm), und aufgrund der flexiblen Kanten werden allerdings nur geringfügige und selten auftretende Schädigungen erwartet. Die Kontinuität der Sohle in Verbindung mit den flexiblen Schaufelkanten erlaubt den Durchgang von Sediment, und würde daher im Gegensatz z.B. zu Turbinen eine der Hauptanforderungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie erfüllen.

## 4 Lastabnahme und Steuerung

### 4.1 Lastabnahme

Die Abnahme der Last von der Welle bringt die Anforderung der Wandlung sehr hoher Torsionsmomente bei niedrigen Drehzahlen auf hohe Drehzahlen mit sich. Getriebelösungen sind sehr kostenintensiv und bringen sehr hohe Gewichte weswegen derzeit hydraulische Lastübertragungen entwickelt werden. Die einfachste derartige Übertragung ist eine doppelt wirkende Kolbenpumpe, mit der bei hohem Druck Wasser auf eine Pelton-Turbine gepumpt wird. Ein Druckkessel sorgt für den Druckausgleich zwischen den einzelnen Kolbenhüben. Bei einer Leistung von 10 kW, einem Betriebsdruck  $p_m$  von 200 m WS und mit einer Geschwindigkeit von 4 U/min stellt sich ein dann mittlerer Druck  $p_m = 0,62 p_{max}$  ein bei dem das überschüssige Volumen der Druckspitze das fehlende Volumen um den Totpunkt ausgleicht. Unter der Annahme dass der Druckbehälter nicht grösser als 100 l sein soll, ergeben sich notwendige Luftvolumina von etwa 50 l. Bei einem Druck von 200 m WS betragen diese Schwankungen für das Beispiel +/- 6,5% um den mittleren Druck  $p_m$ .

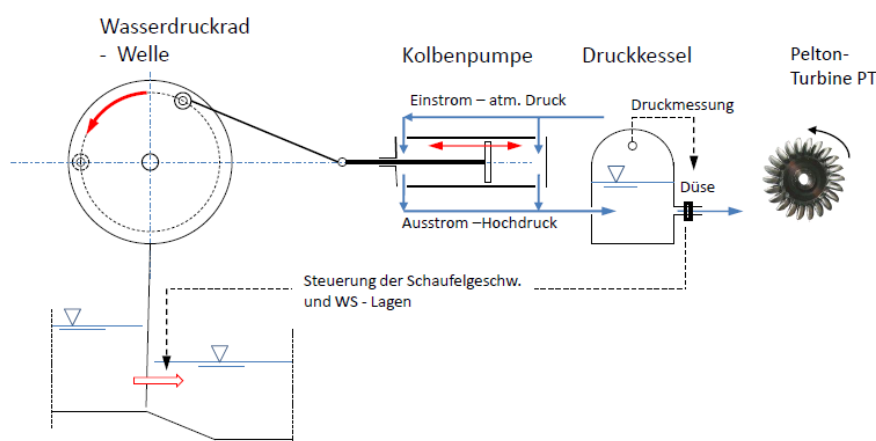
### 4.2 Gesamtwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer hydraulischen Lastabnahme ist notwendigerweise geringer als der einer mechanischen Kraftübertragung, welche einen Wirkungsgrad von 95 – 96% besitzt. Bei Wirkungsgraden des Wasserdruckrades von 80%, der Pumpe von 90%, der Pelton-turbine von 85% und des Generators von ebenfalls 90% ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 58,1% verglichen

mit 68,4% für die Getriebebelösung. Allerdings wird erwartet dass die hydraulische Kraftübertragung bedeutende Kostenersparnisse bringt. Zusätzlich hierzu muss die Stromerzeugung nicht an Wasserrad stattfinden, was bei Platzproblemen wichtig werden kann, und das Gewicht der Lastabnahme (ein 10 kW Getriebe wiegt 1.092 kg !) wird um ca. 60-70% reduziert.

### 4.3 Steuerung

Die Steuerung des WDR kann, da das Torsionsmoment geschwindigkeitsunabhängig ist, über den Betriebsdruck erfolgen. Dabei ist zunächst ein eine stufenweise Steuerung mittels Zu- und Abschalten von drei bis vier Düsen am Peltonrad gedacht: wenn der Betriebsdruck steigt (WS oberstrom steigt) dann werden Düsen zugeschaltet und umgekehrt. Eine Nadeldüse würde stufenlosen Betrieb ermöglichen, jedoch auch den Steueraufwand vergrößern, Abb. 6.



**Abbildung 6** Schemadarstellung von Lastabnahme und Steuerung

### 4.4 Wirtschaftlichkeit

Getriebebelösungen kosten heute wegen der hohen Drehmomente und der notwendigen langen Lebensdauer (> 100.000 Stunden) zwischen 2000 (50 kW) und 2700 (10 kW) €/kW. Bei einem Gesamtwirkungsgrad von 68,4% würde eine 10 kW-Anlage mit Getriebe etwa 60.000 €kosten; dies ergibt bei 4.500 Vollast-Betriebsstunden pro Jahr und einer Einspeisevergütung von 12,7 c/kWh eine Rückzahlzeit von 10,5 Jahren. Eine vergleichbare hydraulische Lastabnahme wird auf etwa 8,500 €geschätzt, bei einem Wirkungsgrad von 58,1% ergibt dies eine elektrische Leistung von 8,5 kW bei gleicher Resource und Gesamtkosten von 41,500 €. Die Rückzahlzeit hier wird 8,5 Jahre. Die Vorteile der hydraulischen Lastabnahme liegen auf der Hand: Die Investitionskosten sind rund 30% niedriger und trotz der um 15% geringeren Leistung wird die Rückzahlzeit deutlich um 15% reduziert.

## 5 Schlussbemerkungen

Das Wasserdruckrad bietet die Möglichkeit Wasserkräfte mit Fallhöhen zwischen 0,1 und etwa 1 m wirtschaftlich und ökologisch verträglich zu nutzen. Theoretische Arbeiten und Modellversuche zeigten dass mechanische Wirkungsgrade von 60 bis 90% möglich sind. Die sehr niedrigen Drehzahlen erforderten die Entwicklung einer neuartigen hydraulischen Lastabnahme. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zeigten dass der verringerte Wirkungsgrad der hydraulischen Lastabnahme durch die reduzierten Kosten ausgeglichen wird. Die Arbeiten zeigten dass die Entwicklung einer neuartigen Wasserkraftmaschine als Systementwicklung durchgeführt werden muss wobei die Maschine selbst, ökologische Anforderungen, Lastabnahme und Steuerung zusammen betrachtet werden müssen.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungstätigkeiten durch die Europäische Kommission im 7. Rahmenprogramm, Vertragsnummer 212423.

## Literatur

- Müller, G., Senior, J., Die Wasserdruckmaschine mit freier Oberfläche: Ein neuer Energiewandler für sehr niedrige Fallhöhen. 10<sup>th</sup> Intl. Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke Ostbayerisches Technologie/Transfer Institut (OTTI) e.V., Regensburg, (2007), S. 26-31.
- Müller W. Die eisernen Wasserräder, Erster Teil: Die Zellenräder, Zweiter Teil: Die Schaufelräder, Atlas. Veit & Comp. Leipzig, 1899.
- Senior J., Saenger N. und Müller G., New hydropower converters for very low head differences, Journ. Hydr. Res., Vol. 48, (2010) No. 6, S. 703-714.
- Weisbach, J. Die Mechanik der Umtriebsmaschinen. In: Die Statik der Bauwerke und die Mechanik der Umtriebsmaschinen für den Unterricht an technischen Lehranstalten sowie zum Gebrauche für Techniker. 5. Ausg., Braunschweig, F. Vieweg und Sohn, 1883.

## Autor:

Dr.-Ing. Gerald Müller,  
University of Southampton  
School of Civil Engineering and the Environment  
Highfield, Southampton SO17 1BJ  
Tel.: +44 – 2890 – 59442  
g.muller@soton.ac.uk